

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА АКУСТИЧНИХ ТА МУЛЬТИМЕДІЙНИХ ЕЛЕКТРОННИХ
СИСТЕМ**

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри

(підпис) С.А. Найда

01 червня 2020 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 171 – Електроніка

на тему: «Акустична експертиза музичного інструменту флейти»


Виконала: студентка 4-го курсу, групи ДГ-гб1-1

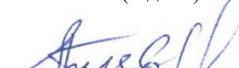
Мазко Анастасія Юріївна

Керівник професор, д.т.н., Продеус А.М.

Рецензент доцент кафедри ЕІ, к.т.н., Шуляк О.П.


(підпис)


(підпис)


(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент


(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

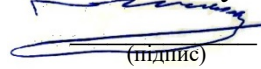
Кафедра акустичних та мультимедійних електронних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 171 – Електроніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

 С.А. Найда
(підпис)

01 червня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Мазко Анастасії Юріївні**

1. Тема роботи «Акустична експертиза музичного інструменту флейти»
керівник роботи Продеус Аркадій Миколайович, д.т.н., професор

затверджені наказом по університету від «25»__05__ 2020 р. № 1196-с

2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові джерела з питань моделювання, приклади спектрально-часового аналізу звуків музичних інструментів та відповідного програмного забезпечення

4. Зміст дипломної роботи (перелік завдань, які потрібно розробити): 1) аналіз літературних джерел; 2) механізм звукоутворення флейти; 3) суб'єктивні та об'єктивні міри якості звуку флейти; 4) структура звуку поперечної флейти: форма сигналу (несуча, обвідна), спектр сигналу.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 12 слайдів презентації у форматі PowerPoint

6. Дата видачі завдання 10.09.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел	30.11.2019	Виконано
2	Опис механізму звукоутворення флейти	30.12.2019	Виконано
3	Вибір суб'єктивних та об'єктивних мір якості звуку флейти	30.01.2020	Виконано
4	Аналіз структури звуків поперечної флейти та флейти-піколо: форма сигналу (несуча, обвідна), спектр сигналу	30.02.2020	Виконано
5	Оформлення дипломної роботи	05.06.2020	Виконано

Студент


(підпис)

А.Ю. Мазко

Керівник роботи


(підпис)

А.М. Продеус

АНОТАЦІЯ

Предметом роботи є методи аналізу звуків музичного інструменту флейти.

Об'єктом дослідження є процеси звукоутворення в музичному інструменті флейта та їх візуалізація шляхом спектрально-часового аналізу.

Метою дипломної роботи є дослідження фізики звукоутворення у флейти, суб'єктивних та об'єктивних характеристик звуку інструменту, оцінювання якості звуку флейти й тембру звучання, можливість застосування цих досліджень на практиці.

В даній роботі проведено детальний аналіз акустичних характеристик двох флейт: поперечної флейти та флейти-піколо з метою оцінювання особливостей тембру звучання даного музичного інструменту.

Одержані наукові результати зможуть бути застосовані при написанні композицій для духових інструментів із застосуванням сучасних методів гри, у виконавській та педагогічній діяльності сучасних музикантів-виконавців. Також отримані результати будуть корисні для фізиків-акустиків при синтезі звуку флейти, враховуючи спектрально-часові особливості звучання інструменту.

ANNOTATION

The subject of the work is the methods of analysis of the sounds of a musical instrument flute.

The object of research is the processes of sound formation in the musical instrument flute and their visualization by spectral-temporal analysis.

The aim of the thesis is to study the physics of sound formation in the flute, the subjective and objective characteristics of the sound of the instrument, to assess the sound quality of the flute and timbre, the possibility of applying these studies in practice.

In this paper, a detailed analysis of the acoustic characteristics of two flutes: transverse flute and piccolo flute in order to assess the characteristics of the timbre of the sound of this musical instrument.

The obtained scientific results can be used in writing compositions for wind instruments using modern methods of playing, in the performing and pedagogical activities of modern musicians. Also, the results will be useful for acoustic physicists in the synthesis of flute sound, taking into account the spectral-temporal features of the sound of the instrument.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АКУСТИКА. МУЗИЧНА АКУСТИКА.....	9
1.1. Акустика духових музичних інструментів.....	13
1.2. Флейта. Система звукоутворення. Акустичні характеристики.....	16
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОХ ФЛЕЙТ: ПОПЕРЕЧНОЇ ФЛЕЙТИ ТА ФЛЕЙТИ – ПІКОЛО	26
2.1. Акустична характеристика поперечної флейти	27
2.2. Акустична характеристика флейти – піколо	57
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	76

ВСТУП

Музиканти використовують такі суб'єктивні характеристики звуку як тон (низький, високий), тембр (теплий, холодний), а також враховують якість виготовлення інструменту, яка впливає на звучання. Фізик або математик використовує свій набір характеристик для опису звуку, - наприклад, амплітуда, частота, швидкість розповсюдження звуку, довжина хвилі. Це цілком природно, оскільки музикант і фізик зацікавлені у якісному звучанні інструменту. Однак жодна з двох галузей дослідження ніколи не є справді відокремленою, і союз музики, фізики та математики завжди є плідним. Результатом такої співпраці має бути надання корисної інформації майстрам, що виготовляють музичні інструменти.

Об'єктивне (автоматизоване) оцінювання виконання музики стало сферою все більшої зацікавленості через зростаючу кількість технологічних систем навчання музики. У більшості цих систем оцінка музичної ефективності базується на точності та висоті звуку, проте якість звучання інструменту також має дуже велике значення.

Аналізуючи стан сучасного музичного мистецтва, ми можемо спостерігати процес активного пошуку у сфері форм, композиційних структур, гармоній, мелодичних ліній та ритму, що призвели до накопичення нових лінгвістичних та композиційних елементів на межі XX і XXI століть. Використання інструментів із незвичним звучанням стало одним із напрямків пошуку в цій області. Це стосувалося й музики для флейти. При цьому композитори зосереджувалися на ускладненні традиційних методів гри на флейті та впровадженні принципово нових методів вироблення звуку.

Знання про походження інструменту дозволяє більш повно зрозуміти процеси, що відбуваються при генеруванні звуку флейти. Особливо це актуально, коли виконавці використовують нові методи гри на флейті, оскільки розуміння та використання можливостей флейти нерозривно пов'язані із розумінням її структури.

Очікується, що отримані в даній роботі наукові результати зможуть бути використаними й на практиці, а саме, як при написанні композицій для духових інструментів із застосуванням сучасних методів гри, так і у виконавській та педагогічній діяльності сучасних музикантів-виконавців.

Що стосується можливого практичного застосування результатів даної роботи, перспектива даної роботи полягає у підвищенні ступеня вивченості звукових характеристик при виконанні духових інструментів на основі суб'єктивних оцінок тембру серед звуків з однаковою висотою та гучністю, що генеруються на одному інструменті. Крім того, на основі записів звуку флейти можна отримати моделі машинного навчання для класифікації виконаних звуків у режимі реального часу. Також, отримані результати можна використати у синтезаторах (електронний музичний інструмент, здатний генерувати, комбінувати і обробляти широкий спектр звуків).

Зазначимо, що спроба отримати надійні моделі для оцінки музичного виконання пов'язана з кількома проблемами. З одного боку, більшість підходів покладаються лише на оцінку точності тону та часу, залишаючи осторонь інші відповідні аспекти музичної інтерпретації, такі як якість тембру. З іншого боку, існує високий ступінь суб'єктивності щодо визначення семантичних міток високого рівня для якості тону серед музичних експертів, що значно ускладнює генерацію тембрових моделей, що відповідають семантичним позначкам експертів.

РОЗДІЛ 1

АКУСТИКА. МУЗИЧНА АКУСТИКА.

Акустика – це наука про звук, назва якої походить від грецького слова «акуо» - чую. Задачею акустики є вивчення фізичної природи звуку і проблем, зв'язаних з його виникненням, поширенням та сприйняттям.

Звук має подвійну природу:

- з одного боку, це об'єктивний процес передачі енергії механічних коливань частинок в пружному середовищі (повітря, рідина, тверде тіло);
- з другого боку, це тільки такі види механічних коливань середовища, котрі сприймаються слуховою системою.

Таким чином, звук – це особливий вид механічних коливань, здатних викликати слухові відчуття.

Три головні проблеми входять в сферу інтересів сучасної акустики:

- утворення звуку, що потребує вивчення фізичної природи звуку, а також методів та засобів його створення. Цими питаннями займається акустика музичних інструментів, акустика мови, електроакустика та ін.
- передача звуку від джерела до слухача – це задачі архітектурної акустики, електроакустики та ін.
- сприйняття звуку слуховою системою і зв'язок слухових відчуттів з об'єктивними параметрами звуку – це задачі психоакустики.

Слухова система людини сприймає тільки обмежений клас механічних коливань середовища, які знаходяться у визначених межах за рівнем гучності (зміна рівня звукового тиску від 0 дБ до 120 дБ) и по висоті (зміна частоти від 20 Гц до 20кГц).

Всі оточуючі звуки можна умовно розділити за різними ознаками, наприклад:

- по способу створення – на натуральні та штучні (природний шум, мова, музика, біосигнали, електронні звуки)

- з інформаційною ознакою – на звуки для передачі семантичної (сміслової) та емоційної інформації (мова, спів, музика); для передачі інформації про навколишнє середовище (шум, сигнальні звуки тощо)

- по фізичним параметрам, такі як: частотний діапазон (інфразвук, ультразвук, гіперзвук тощо); степінь передбачуваності (випадкові сигнали, білий шум, детерміновані сигнали, квазі-випадкові сигнали, також музика та мова); тимчасова структура (періодичні, неперіодичні, імпульсні тощо) та ін.

У ХХ ст. в акустиці відокремилося більше двадцяти самостійних напрямлень, більш важливі є наступні:

1. Загальна (фізична) акустика – теорія випромінювання та поширення звуку в різних середовищах, теорія дифракції, інтерференції та розсіювання звукових хвиль. Лінійні та нелінійні процеси поширення звуку.

2. Архітектурна акустика – закон поширення звуку в закритих (напівзакритих, відкритих) приміщеннях, методи управління структурою поля в приміщенні та ін.

3. Будівельна акустика – захист від шуму будівель, промислових підприємств та ін.

4. Психоакустика – основні закони слухового сприйняття, визначення зв'язку об'єктивних та суб'єктивних параметрів звуку, визначення законів розшифровки «звукового образу».

5. Музична акустика – проблеми створення, поширення та сприйняття музичних звуків, точніше – звуків, які використовуються в музиці.

6. Біоакустика – теорія сприйняття та випромінювання звуку біологічними об'єктами, вивчення слухової системи різних видів тварин тощо.

7. Електроакустика – теорія і практика конструювання випромінювачів та приймачів, які перетворюють електричну енергію в акустичну та навпаки, а також всі елементи сучасних звукових трактів записів, передачі та відтворення звуку.

8. Аероакустика (авіаційна акустика) – випромінювання та поширення шумів в авіаційних конструкціях, методи звукоізоляції і звукопоглинання, теорія поширення ударних звукових хвиль та ін.

9. Гідроакустика – поширення, поглинання, затухання звуку у воді, гідроакустичних перетворювачів, теорія антен і гідроакустичних ехолокаторів, розпізнавання рухаючих об'єктів та ін.

10. Акустика транспорту – аналіз шумів, розробка методів та засобів звукопоглинання і звукоізоляції і різних видах транспорту.

11. Медична акустика – розробка медичної апаратури, заснованої на обробці та передачі звукових сигналів.

12. Ультразвукова акустика – теорія ультразвуку, створення ультразвукової апаратури, також ультразвукових перетворювачів для промислового використання в гідроакустиці, вимірювальної техніки тощо.

13. Квантова акустика (акустoeлектроніка) – теорія гіперзвуку, створення фільтрів на поверхневих акустичних хвилях тощо.

14. Акустика мови – теорія і синтез мови, виділення мови на фоні шумів, автоматичне розпізнавання мови тощо.

15. Цифрова акустика – активно розвивається в останні роки, поступово виділяється в самостійне направлення у зв'язку зі створенням нового покоління мікропроцесорної і комп'ютерної техніки.

У моїй бакалаврській роботі буде використано музичну акустику, яка є одним із напрямлень акустики і займається всім комплексом проблем, зв'язаних зі створенням звуків, які використовуються в музиці та співі; передачею їх до слухачів і їх слуховим сприйняттям.

Сучасна музична акустика представляє собою у широкому сенсі слова синтез різноманітних напрямлень науки і техніки: акустики мови та співу, акустики музичних інструментів, електроакустики, архітектурної акустики, психоакустики тощо.

Враховуючи, що сучасні комп'ютерні технології відкрили принципово нові можливості в розвитку музичної акустики, вона все більше поглиблюється у

вирішенні таких проблем як: розшифровка «слухового образу», тобто цілісне сприйняття музики та мови; створення фізичних комп'ютерних моделей музичних інструментів, голосів, слухової системи та ін.; створення нового музичного комп'ютерного інструментарія; інших питань, які вивчаються в музичній психології, теорії музики, інструментознавства.

Такий синтез музичних наук і акустики створює сучасну наукову базу для вирішення проблем розвитку та вдосконалення музичного мистецтва.

Музична акустика є науковою основою утворення представників музичного мистецтва: композиторів, музикознавців, виконавців тощо, оскільки вона служить базою для розуміння основ теорії музики, музичної психології, комп'ютерних музичних технологій, принципів створення електронної музики тощо; для розвитку інструментознавства (аналіз механізмів звукоутворення в різних музичних інструментах, створення їх комп'ютерних фізичних моделей, розвиток нового комп'ютерного інструментарія тощо); для вдосконалення вокального та музичного виконавства та ін.

1.1. Акустика духових музичних інструментів

Аналіз процесів звукоутворення у свистячих інструментів показує, що у них приймають участь наступні компоненти:

- Генератор – джерело енергії, викликаючи рух повітряного струменя;
- Вібратор – коливний відносно гострого краю повітряний струмінь, а також пристосування для її регулювання і направлення;
- Резонатор – повітряна порожнина в трубі, яка посилює процес звукоутворення.

Прикладом може служити процес звукоутворення в поперечній флейті, де в якості джерела сили (генератора) використовується дихальний апарат. Сила м'яз діафрагми, грудної клітки, обличчя та ін. створює джерело енергії, котрий регулює рух повітря з більшою або меншою швидкістю. В якості вібратора використовується коливання повітряного струменя, пристосуванням для регулювання котрого є губи та язик музиканта, і також гострий край бокового отвору в стінці труби флейти. Резонатором є повітряний стовп в циліндричній трубці, розташованою поруч бічних отворів.

Основним механізмом перетворення енергії повітряного потоку у коливання стовпу повітря в резонаторі є явище «динамічної нестабільності», яке призводить до появи так званих «крайових тонів».

Збудження коливань методом «крайових» тонів. Всюди, де струмінь повітря проходить з великою швидкістю мимо краю якоїсь перешкоди, можуть утворюватися «крайові тони» (свист вітру у вітрилах, гудіння проводів та ін.). це явище давно використовувалось у своєрідному музичному інструменті – «еоловій арфі», що складається з рамки з натянутими струнами, яка ставилась на шляху вітру, котрий дує. Причиною утворення крайових тонів є нерегулярність потоків вітру, яка призводить до появи вихорів. Такі нестабільні нерегулярні потоки повітря можуть виникати і тоді, коли струмінь витікає з вузького отвору або щілини. Тут можна розглядати три можливі ситуації: потік повітря виривається з вузької щілини; потік повітря виривається з щілини і натикається на гостру кромку твердого тіла; потік повітря і кромка

сполучаються з резонатором. Всі ці три процеси з'єднуються в лабіальних духових інструментах.

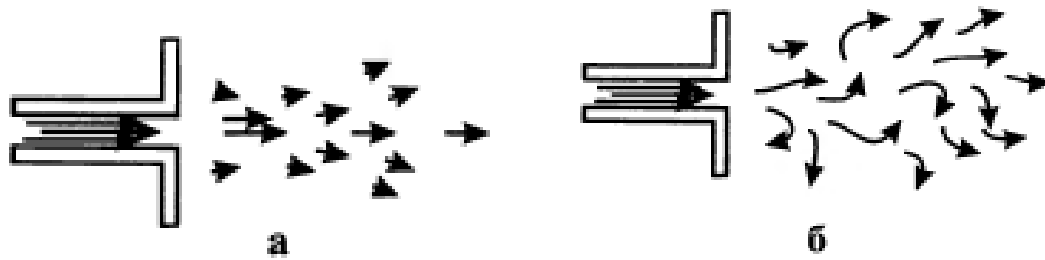


Рис.1 : струмені повітря, які витікають з щілини: а – ламінарна, б – турбулентна

Розглянемо їх послідовно:

- Якщо струмінь повітря виходить у велике середовище з вузької щілини з малою швидкістю та плавно розтікається (рис.1 а), то такий потік називається ламінарним. Якщо при зростанні швидкості струменя витікаючий потік стає нестабільним, в ньому утворюються вихори (локальні згущення частинок повітря з підвищеним тиском) і напрямлення руху струменя стає хвилеподібним, то такий потік називається турбулентним (рис.1 б). вихори, а отже, і вигини руху струменя поширюються зі швидкістю $v \sim 0.4V$, де V – швидкість руху струменя. В результаті утворення вихорів в потоці виникають локальні згущення та розрідження повітря, поширення «стиснення-розрідження» в повітрі утворює звукову хвилю, котра при визначених умовах може викликати відчуття висоти тону (наприклад, «свистячий» чайник), хоча зазвичай ці завихрення створюють сильні турбулентні шуми (виникаючі, наприклад, при русі ракет, літаків тощо);
- При наявності перешкоди у вигляді гострої кромки на шляху витікаючої з великою швидкістю з щілини струменя процес вихороутворення посилюється і струмінь розбивається на два потоки по обидві сторони кромки. У турбулентному струмені розбиття відбувається не на дві рівні частини, як це було би в ламінарному потоці, а в силу згинальної форми

руху струменя основна частина струменя направляється по одну із сторін краю кромки (рис. 2). Оскільки на цій стороні утворюється найбільша кількість вихорів, тобто зон з надлишковим тиском, а на іншій стороні кромки тиск виявляється меншим, то вихори починають перетикати на іншу сторону і «виштовхують» при цьому струмінь, змінюючи напрямлення його руху, потім процес повторюється (рис. 3). В результаті відбуваються періодичні коливання струменя біля гострого краю, при цьому можуть виникати тональні звуки, так звані «крайовими тонами». Таким чином, в лабіальних інструментах роль вібратора виконує повітряний струмінь.

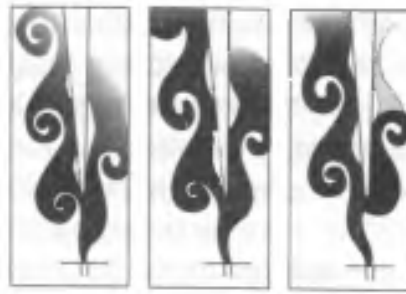


Рис. 3 Турбулентний повітряний струмінь на гострій кромці

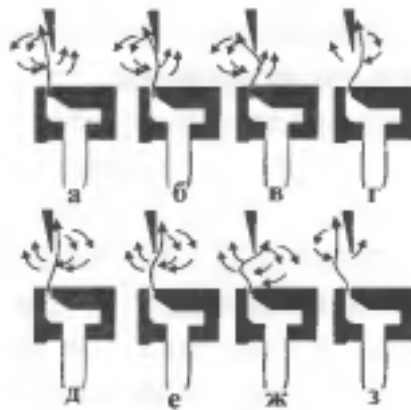


Рис. 4 Коливання повітряного струменя біля жорсткої кромки в лабіальних органних трубах

У таких лабіальних інструментах, як флейта і лабіальні труби органу, використовуються циліндричні труби закриті з одного кінця або відкриті з обох кінців. Якщо проаналізувати картину стоячих хвиль у відкритих трубах, то у них обох кінцях утворюються вузли (нулі) звукового тиску, а середині труби знаходиться максимум тиску (мінімум швидкості). Як впливає з рис. 5, на

основній (першій) резонансній частоті вздовж довжини труби вкладається половина довжини хвилі. Отже, основна власна частота зв'язана з довжиною труби наступним відношенням: $f_0 = c/\lambda = c/2L$.



Рис. 5 форми резонансних коливань повітряного стовпу у відкритій трубі

Зазвичай частота крайового тону підбирається в початковий момент трохи вище частоти основного тону труби, однак при утворенні резонансних коливань вони «нав'язують» свою частоту, трохи знижуючи при цьому частоту крайового тону. Цей процес відображається на структурі перехідних процесів в лабільних інструментах та, відповідно, на тембрі їх звучання.

1.2. Флейта. Система звукоутворення. Акустичні характеристики.

Інструменти флейтової групи мають давню історію. Вірогідно, першими використовувались дудочки з тростинку або з бамбуку. Поздовжня флейта, добре відома в Римі, з'явилась в Європі біля XI століття (блокфлейта) і до XVII століття була достатньо поширена як концертний інструмент, але на початку XVII століття вона була витіснена поперечною флейтою, перші згадки про яку зустрічаються ще в IX столітті до н.е. в Китаї. Оркестрова поперечна флейта в сучасному вигляді була удосконалена в період з 1832 до 1847 рік Т. Бьомом – винахідником та музикантом з Мюнхена. Він ввів нову систему отворів з різними клапанами (спочатку відкритими або закритими) і систему важелів для управління ними, збільшив діаметри отворів, змінив їх розташування і остаточно ввів параболічну голівку (закриту частину на кінці флейти). Все це значно збільшило гучність інструменту, що дозволило широко використовувати флейту, як у симфонічному оркестру, так і при сольному виконанні.

У теперішній час використовується декілька різновидів флейт: велика поперечна флейта, флейта – піколло, а також альтова флейта, поздовжня блок флейта та інші.

Конструкція: сучасна поперечна флейта складається з трьох частин (рис. 6): головна частина (голівка, 1) з амбушурним отвором (дульцем, 2) і пробкою(3); основна частина (середнє коліно, 4) з більшістю робочих отворів і клапанів (5); кінцева частина (нижнє коліно, 6) з отворами і клапанами для правої руки (7). З'єднання головної та основної частин зроблено рухомим, щоб можна було підлаштовувати інструмент. Загальна довжина трубки 605 – 616,5 мм, діаметр відкритого кінця 19 мм. Трубка майже циліндрична, внутрішній діаметр трубки у закритого кінця приблизно 16.6 мм, потім він поступово розширюється до виходу до 19 мм. Це робиться для того, щоб злегка підняти другу гармоніку, так як наявність амбушурного отвору її занижує. Пробка з гвинтом (3) закритого кінця встановлена для підбору довжини вузької порожнини між отвором та пробкою.

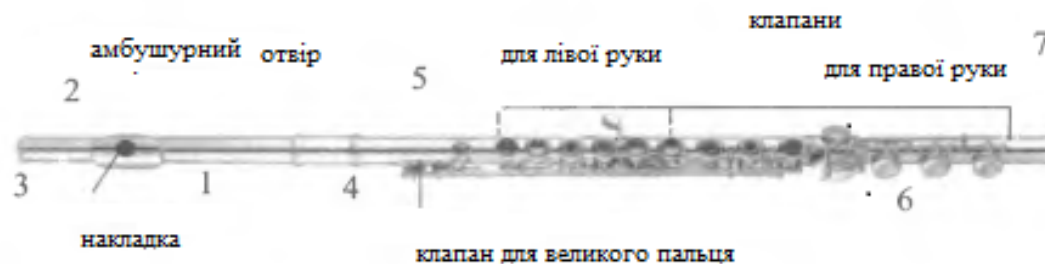


Рис. 6 Конструкція поперечної флейти

Надзвичайно важливими для налаштування та якості звучання флейти є такі елементи конструкції, як форма головної частини труби, форма амбушурного отвору, розмір простору між цим отвором та пробкою та ін. (рис. 7). Їх вплив був детально вивчено різними спеціалістами. Це дозволило отримати цікаві результати: зокрема, було встановлено, що вибір розмірів амбушурного отвору істотно впливає на якість звуку (при малих діаметрах отвору звук отримується більш слабким, при великих діаметрах – більш гучним, але менш контрольованим). В сучасних флейтах для вдунання повітря використовується еліптичний отвір (ближче до прямокутного) з розмірами 10 x

12 мм. Оскільки в металевих флейтах товщина стінок труби приблизно 0.3 мм, що дуже мало для амбушурного отвору (він буде працювати не ефективно, особливо для низьких частот), використовується спеціальна металева накладка (рис. 7) з достатньо зручною для підтримки губ формою. Стінки отвору нахилені під кутом $\sim 7^\circ$.



Рис. 7 Форми головної частини флейти

Величина порожнини між пробкою і амбушурним отвором також істотно впливає на величину поправки до довжини труби за рахунок крайового ефекту, тобто на степінь негармонічності спектру. Експериментально було встановлено, що зробити поправку майже постійною в діапазоні до 2кГц можна вибором відстані між центром отвору та пробкою приблизно 17 мм.

На флейті є 14 (інколи 15-16) отворів з наступними розмірами: висота 1.5 мм, діаметр від 6.7 мм до 15.5 мм (розміри збільшуються ближче до відкритого кінця). При грі використовується всі три перераховані вище види отворів: частина відкривається або закривається безпосередньо пальцями лівої та правої рук, частина за допомогою клапанів (приклад використання отворів показаний на рис. 8). Як вже було відмічено, бокові отвори виконують роль високочастотного фільтра; при вказаному вище виборі числа, діаметрів і розташування отворів частота зрізу такого фільтра становить біля 2000 Гц.

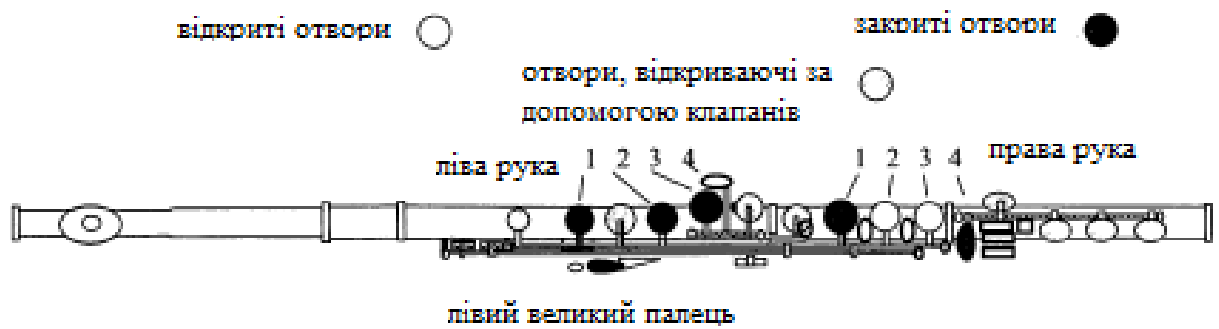


Рис. 8 Приклад використання отворів при грі на флейті

Механізм звукоутворення в поперечній флейті включає в себе всі перераховані вище процеси: утворення крайових тонів, збудження резонансів в трубі, взаємодія коливань стовпу повітря і повітряної турбулентного струменя, встановлення режиму автоколивань і режиму випромінювання.

«Крайові» тони утворюються за рахунок коливань повітряного струменя у кромки амбушурного отвору при вдуванні повітря з певною швидкістю (рис. 9). При виконанні на флейті музикант контролює наступні параметри: швидкість вдування, довжину повітряного струменя (відстань від губ до амбушурного отвору – рис. 10), кут нахилу струменя, площу відкривання губ, кількість та місце відкриваючих або закриваючих отворів та інше.



Рис. 9 Спосіб утворення крайових тонів у флейти

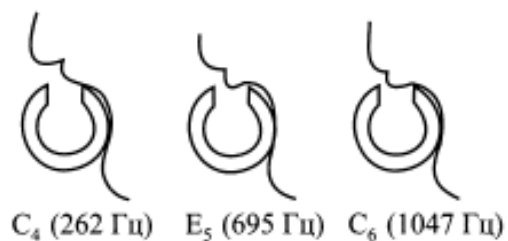


Рис. 10 Зменшення відстані до амбушурного отвору при зміні висоти тону

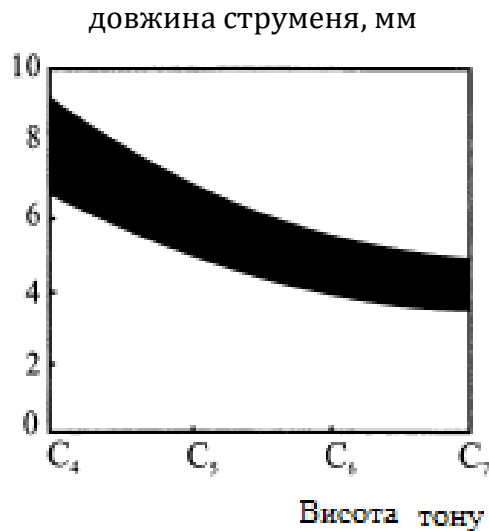


Рис. 11 Залежність висоти тону флейти від довжини повітряного струменя

Як було встановлено в процесі досліджень механізму звукоутворення флейти, для підвищення тону на октаву (методом передування) необхідно:

- Зменшити довжину струменя (приблизно на 20%), тобто приблизити губи до амбушурного отвору. Експериментально було показано, що при переході до більш високих тонів відстань до отвору зменшується у відповідності з кривою, показаній на рис. 11. Необхідно відмітити, що при цьому змінюється склад спектру: при зменшенні відстані (приближення губ до отвору) спектральний склад звуку збагачується, збільшується число обертонів, відповідно змінюється тембр;
- Зменшити відкриття губ (приблизно на 30%), збільшивши при цьому тиск вдування струменя майже в два рази, що відповідає збільшенню швидкості струменя приблизно на 40%.

Залежність висоти тону від повітряного тиску і площі відкриття губ показана рис. 12а,б .

Велике значення має також вибір кута вдування: наприклад, щоб отримати низькі тони на відносно гучному рівні, використовується тупий кут, приблизно на $25-40^{\circ}$ нище горизонтальної площини.

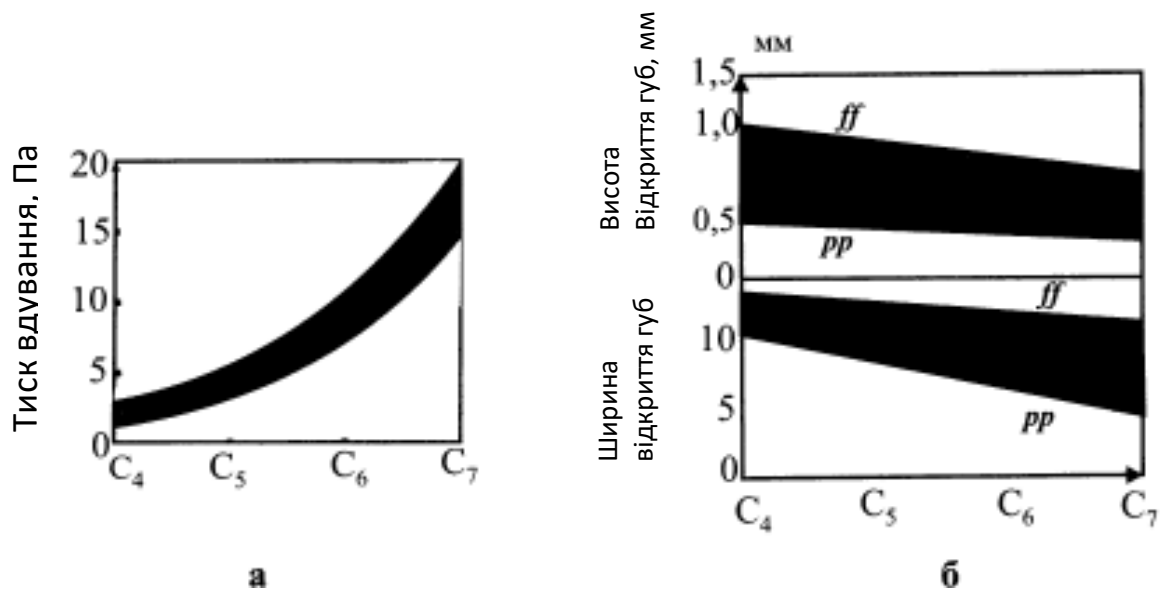


Рис. 12 Залежність висоти тону флейти:

а – від величини тиску повітря в струмені, б – від площі відкриття губ

спектральний зміст звуку залежить від степені симетричності струменя. При направленні вдування, строго симетричному відповідно кромки, підкреслюються непарні гармоніки. При несиметричному направленні вдування в спектрі з'являються як парні, так і непарні гармоніки. Таким чином, змінюючи кут вдування повітряного струменя при грі на флейті, можна змінювати співвідношення між парними та непарними гармоніками і, відповідно, тембр звучання.

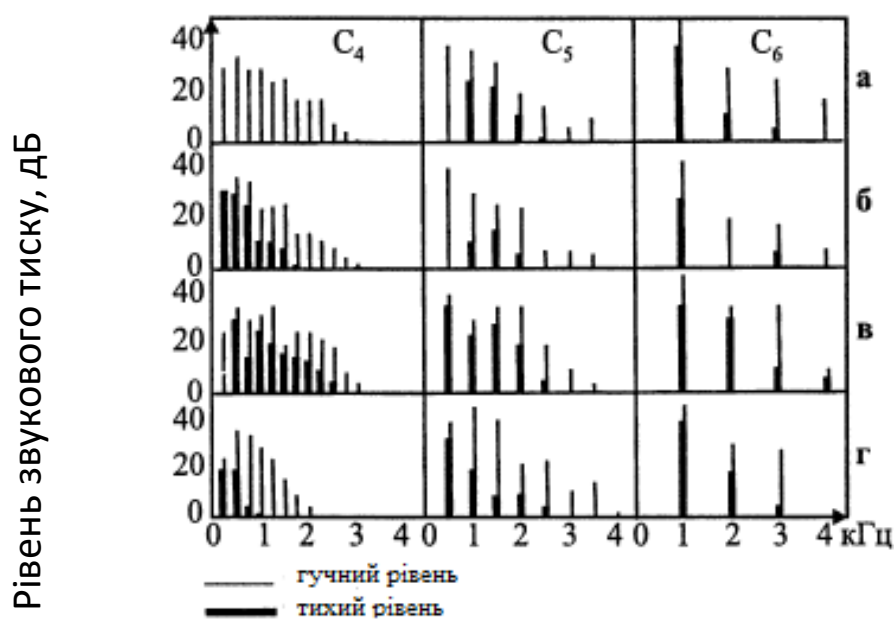


Рис. 13 Зміна спектру звуку при збільшенні висоти тону на гучному та тихому рівні у чотирьох різних виконавців на флейті (а,б,в,г)

Спектральний аналіз тонів, зіграних на флейті чотирма різними музикантами, показує, що в спектрі присутні всі гармоніки – як парні, так і непарні, проте амплітуди цих гармонік швидко зменшуються, при цьому по мірі збільшення гучності виконаних тонів підвищується рівень високих гармонік. Таким чином, один і той же тон, виконаний на флейті з різною гучністю, буде мати різний спектральний склад і, відповідно, різний тембр, що дуже важливо враховувати при звукозаписі.

Як і у всіх лабіальних інструментів, спектральний склад звуків флейти володіє певною негармонічністю за рахунок «крайового ефекту», котрий має місце на відкритому кінці, на амбушурному отворі і на бокових отворів.

При грі на флейті використовується частотна модуляція (вібрато) за рахунок невеликої варіації тиску вдування з частотою 5 – 6 Гц. При цьому, як показує аналіз, глибина модуляції найбільша на високих гармоніках, що надає особливий тембр звучання.

Специфічною особливістю звуків флейти є наявність шуму за рахунок вихреутворення у турбулентного струменя. Для визначення степеню турбулентності струменя в аеродинаміці використовується зазвичай спеціальна величина – число Рейнольдса

$$R = \rho V_c h / \mu ,$$

де ρ – щільність середовища, V_c – швидкість струменя, h - товщина струменя (в приведенних нижче даних прийнято $h \sim 1.0$ мм), μ – в'язкість середовища. При грі на флейті число Рейнольдса може досягати значення 3000, що відповідає швидкості струменя приблизно 45 м/с; при цьому має місце виражений турбулентний шикрокосмуговий шум, виникаючий у амбушурного отвору, який фільтрується резонансами труби, набуваючи визначену тональну окраску. Оскільки при переході до більш високих тонів швидкість струменя повинна зростати, то і рівень турбулентного шуму відповідно зростає. Все це вносить специфічну окраску в тембр звучання флейти.

Необхідно відмити також, що на резонансні частоти флейти впливає швидкість звуку, котра сильно залежить від температури і змісту вуглекислого газу в навколишньому середовищі.

Матеріал. Сучасні поперечні флейти роблять в основному з різних еталів: *латуні* (недорогий жовтуватий сплав міді та цинку), при цьому зовні їх покривають нікелем або сріблом; *білої латуні* (сплав міді, цинку та нікелю білого кольору); срібла – оскільки чисте срібло м'який метал, зазвичай для флейт використовується сплав 92.5 % срібла та 7.5 % міді; *золота* – зазвичай у сплаві з міддю, інколи золото використовується для виготовлення амбушурних пластин, які безпосередньо дотикаються з губами музиканта. Для виготовлення клапанів та пружин використовується біле золото (сплав золота з цинком, нікелем, хромом та кадмієм), спеціальна сталь або фосфорна бронза. Відомі флейти, виготовлені з дерева і навіть из фарфору. Не дивлячись на багаточисленні твердження, що флейти із срібла та золота дають найчистіший звук, експерименти показали, що склад матеріалу не робить дуже істотного впливу на якість звуку; більш істотною є точність виготовлення конструктивних елементів флейти (гладкість внутрішніх стінок, точність змін діаметра труби, розташування та діаметрів отворів та ін.).

Акустичні характеристики. *Частотний діапазон* звучання великої концертної флейти становить: для основних тонів від 246.94 Гц до 2489.02 Гц, однак ноти нижче «до» першої октави (C4) та вище «до» четвертої октави (C7) важко витягуються, тому зазвичай використовується діапазон від 261.6 Гц (C4) до 2093.0 (C7). При виконанні на достатньо гучному рівні повний частотний діапазон за рахунок обертонів має верхню межу приблизно до 6кГц. Для флейти піколло основний діапазон становить 578.3 Гц – 4186 Гц.

Характерною особливістю флейти є плавний спад амплітуд парних та непарних гармонік відносно амплітуди основної частоти. У спектрі найбільш виражені амплітуди гармонік від першої до п'ятої (рис. 14). При переході до більш високих тонів кількість гармонік зменшується, енергія зосереджується в області основного тону, при чому непарні гармоніки трохи перевищують над

парними. Є слабо виражена форматна область біля 800 Гц. У спектрі присутні шумові компоненти (за рахунок турбулентного шуму вдування); при цьому у неперервному спектрі шуму проявляються тональні компоненти, особливо при «передуванні» за рахунок випадкового збудження окремих «невикористаних» резонансів.

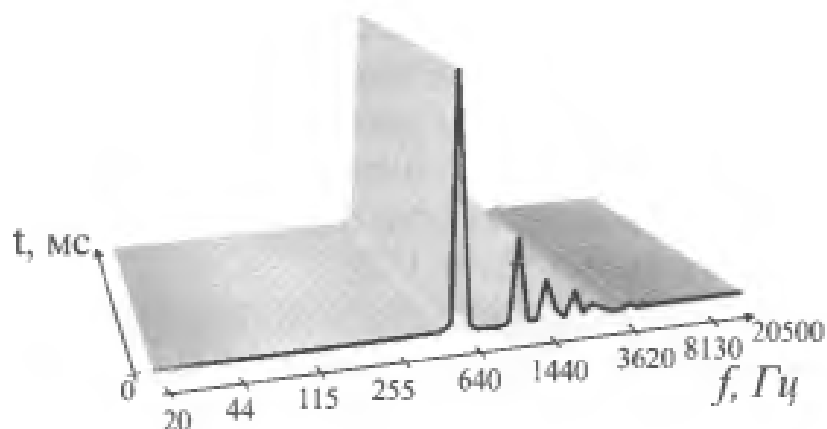


Рис. 14 Трьохвимірний спектр флейти

Динамічний діапазон становить 25 дБ на низьких та 10 дБ на високих частотах. Максимальний рівень для низьких нот досягає 75 дБ, для високих нот – 85 дБ (на відстані 9 м від інструменту). Тихі рівні зростають від 50 дБ для низьких тонів до 75 дБ для високих.

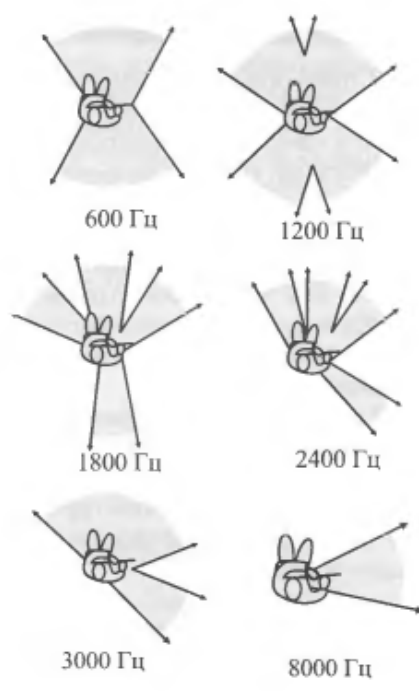


Рис. 15 Форми характеристик направленості флейти на різних частотах

Перехідні спотворення: час атаки звуку у флейти найдовше серед групи дерев'яних інструментів. Тривалість наростання звуку зменшується з підвищенням тону від 100 мс до 30 мс. Форма атаки та спаду повільна, однак процес вступу обертонів характеризується первісною появою високих компонент (через шуми вдування) і так названих «попередніх» тонів, обумовлених тим, що крайові тони збуджують на початку процесу атаки більш високі обертони. Тривалість цих високих тонів під час атаки досягає приблизно 50 мс.

Коефіцієнт корисної дії цього інструмента низький, менше 1%, гра на флейті потребує великого об'єму повітря при не економічному витрачанні його.

Характеристика направленості залишається достатньо широкою до високих частот, так як діаметр вихідного отвору малий порівняно з довжиною хвилі. Є доволі значне випромінювання від амбушурного отвору та від відкритих бокових отворів, котрі починають випромінювати з частоти порядку 2кГц. Вигляд характеристики направленості на різних частотах показано на рис. 15.

Тембр звучання флейти чистий, світлий, прозорий у середньому регістрі, який переходить в різкі звуки, котрі свистять, у високому регістрі.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОХ ФЛЕЙТ: ПОПЕРЕЧНОЇ ФЛЕЙТИ ТА ФЛЕЙТИ – ПІКОЛО

Акустичні характеристики звуку флейти, як об'єктивні параметри якості звучання інструменту, досліджувалися протягом останніх десятирічь провідними російськими та зарубіжними вченими. Поряд з вивченням фізичних особливостей звукоутворення, аналізувалися частотні і часові характеристики музичного сигналу. Результати таких досліджень, в першу чергу, були корисні для розробників і виробників музичних інструментів, для виконавців і слухачів та для інженерів – акустиків для синтезування звуку.

Об'єктивний аналіз музичного звуку дозволяє вирішувати низку нових задач музикознавства, однак для цього потрібно виявити відношення фізичних та музикознавчих параметрів звуку. Науковий підхід в цій області став розвиватися в ХІХ ст. і має два основні напрямлення – аналіз тембру та висоти звуку. Обидва напрямлення мають «труднощі перекладу» з «фізичної мови» на «музикознавчий».

Результати такої роботи допоможе у створенні спеціальних програм аналізу звуку для задач музикознавства. Аналіз варіацій тембру в електроакустичній музиці дозволить виявити складні звукові конструкції, які не розпізнаються на слух.

Область застосування результатів: фактично в комп'ютерному аналізі музичного звуку успішно вимірюється тільки три об'єктивних показника – частота, інтенсивність та тривалість компонентів звуку, зв'язані відомим способом зі суб'єктивними – висотою звуку, який сприймається, гучністю та тривалістю; багато інші характеристики залишаються з рамками дослідження.

Такі всі темброві властивості - бархатистість, сріблястість тощо, для яких немає будь-яких кількісних шкал оцінювання ні у «фізиків», що розробляють об'єктивні методи вимірювання музичного звуку, ні у самих музикознавців.

Наприклад, є Альбом візуальних характеристик музичних звуків Ананьєва А.Б., де автор дав лише загальний огляд характеристик різних інструментів, але

немає детального аналізу характеристик звуків флейт. Тому пропонується в даному розділі виконати детальний аналіз акустичних характеристик звуку флейти.

2.1. Акустична характеристика поперечної флейти

Для аналізу акустичних характеристик поперечної флейти, звуки флейти були записані за допомогою програми Matlab.

Команди запису звуків гами від Ля першої октави до Ля другої октави мають такий вигляд:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 5);
disp('End of Recording.');
```

`y = getaudiodata(recObj);`
`play(recObj);`
`plot(y);`
`grid on`
`audiowrite('flute_1.wav',y,8000);`

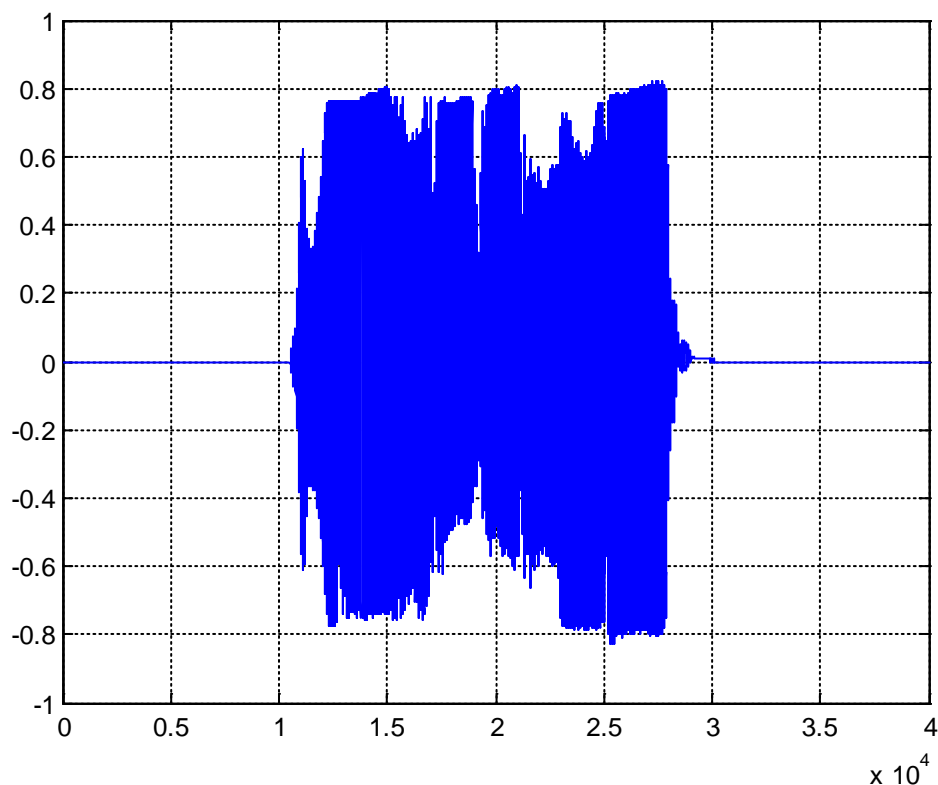


Рис. 1 Розгортка сигналу в часі гами від ноти Ля 1-ої октави до ноти Ля 2-ої октави

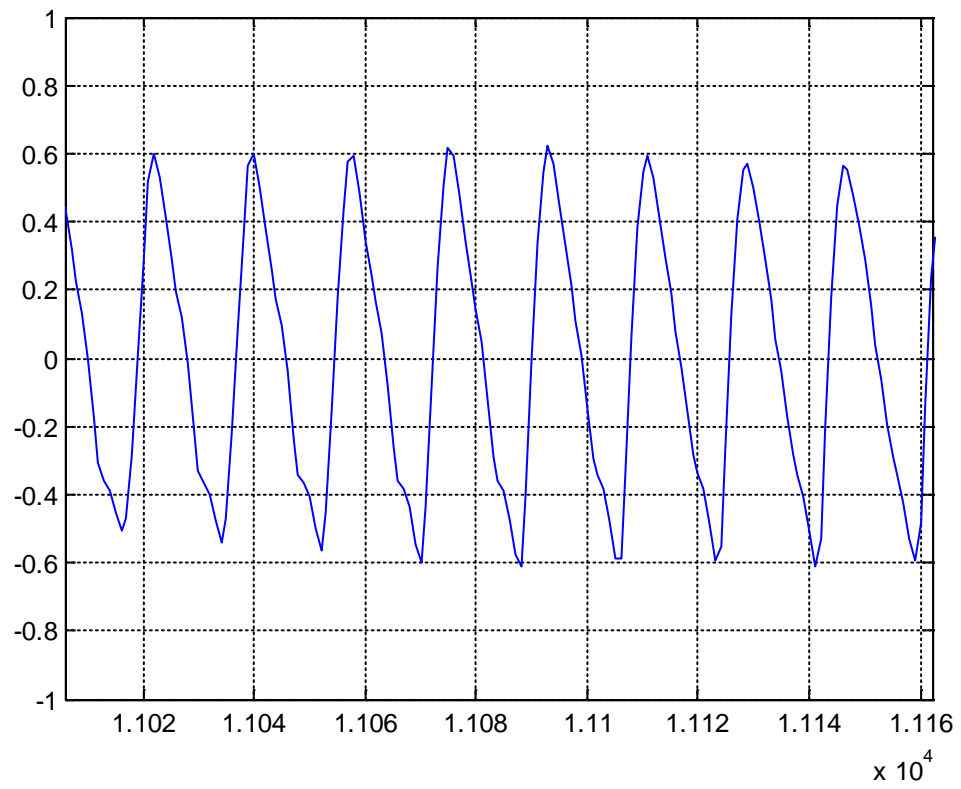


Рис. 2 Форма сигналу на початку сигналу

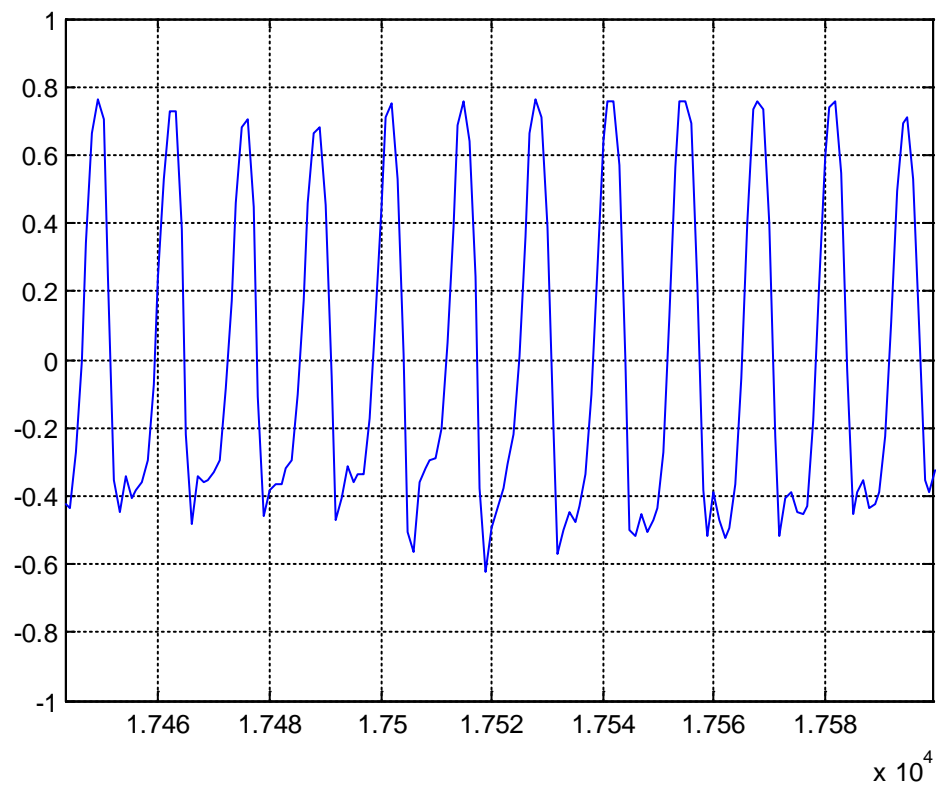


Рис. 3 Форма сигналу всередині сигналу

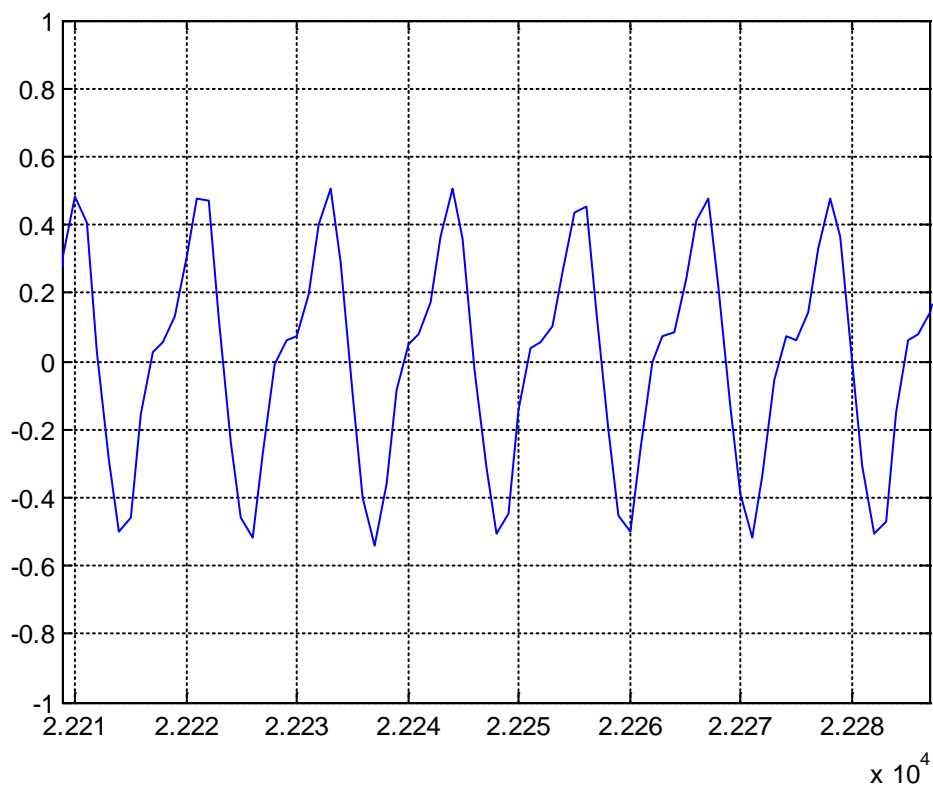


Рис. 4 Форма сигналу всередині сигналу

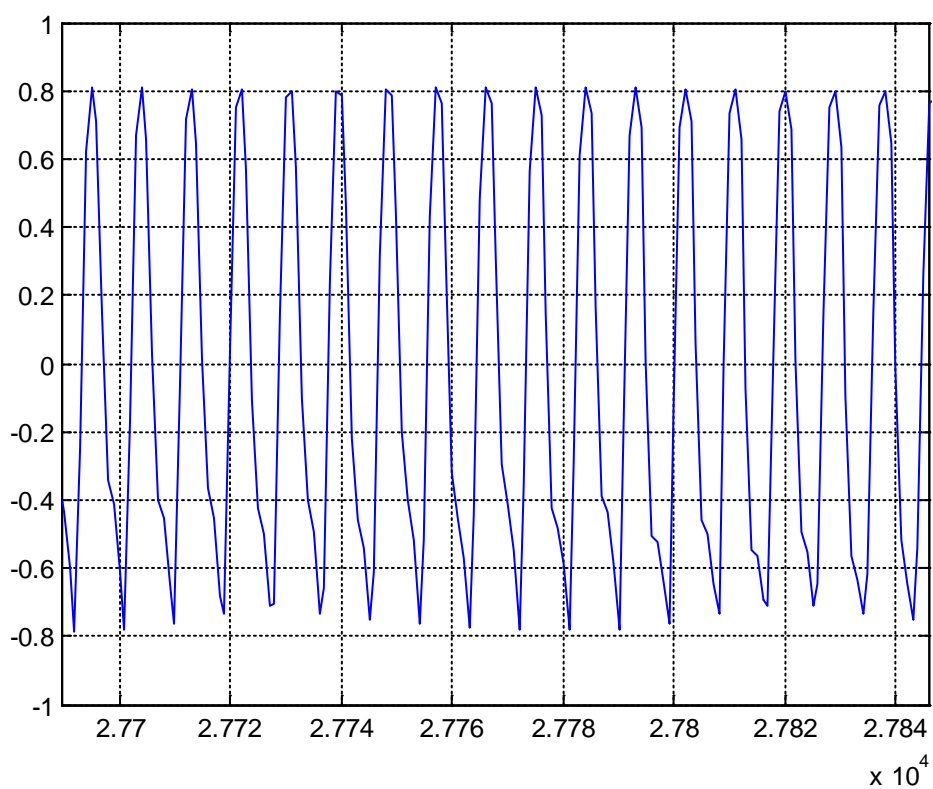
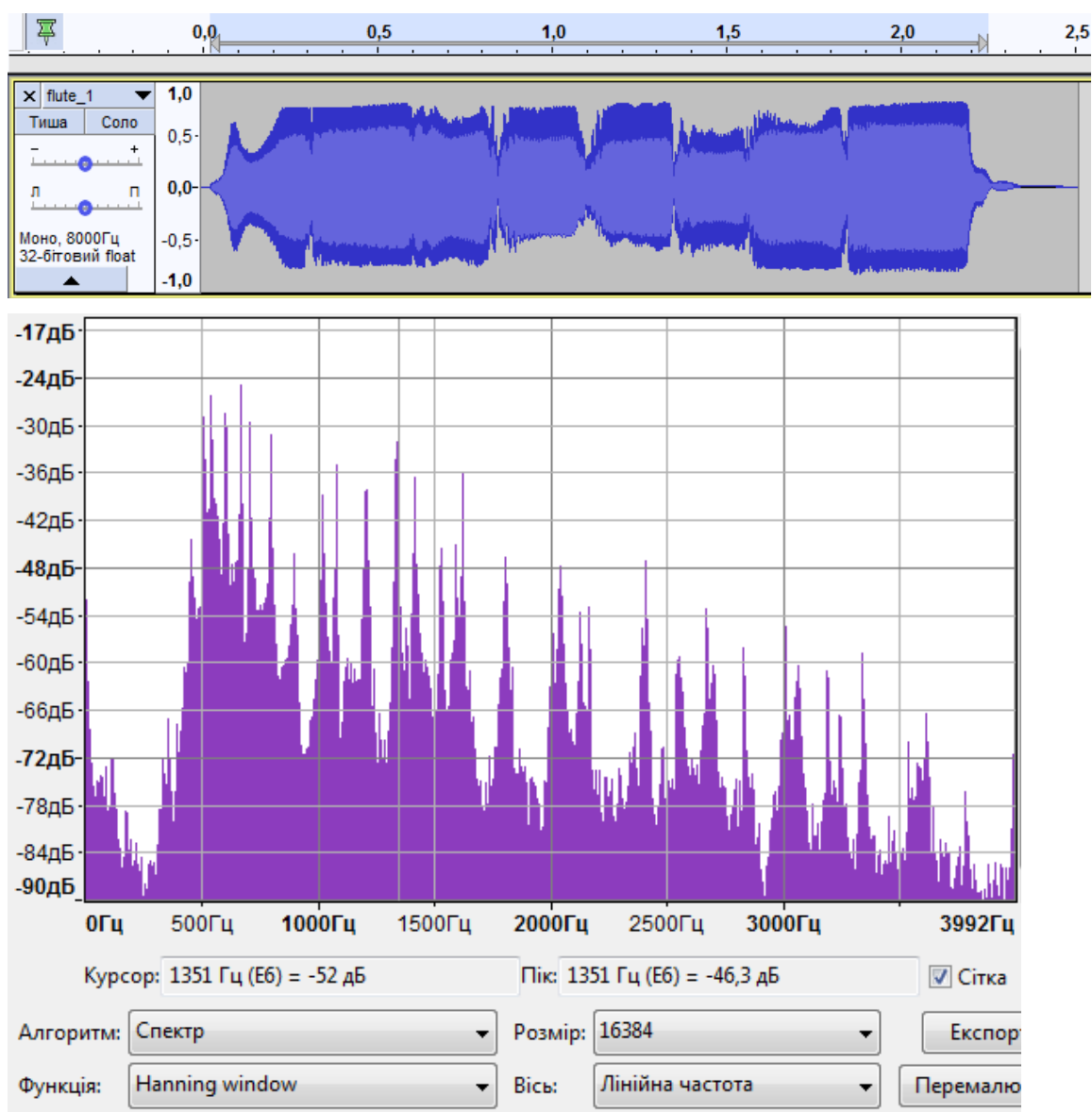
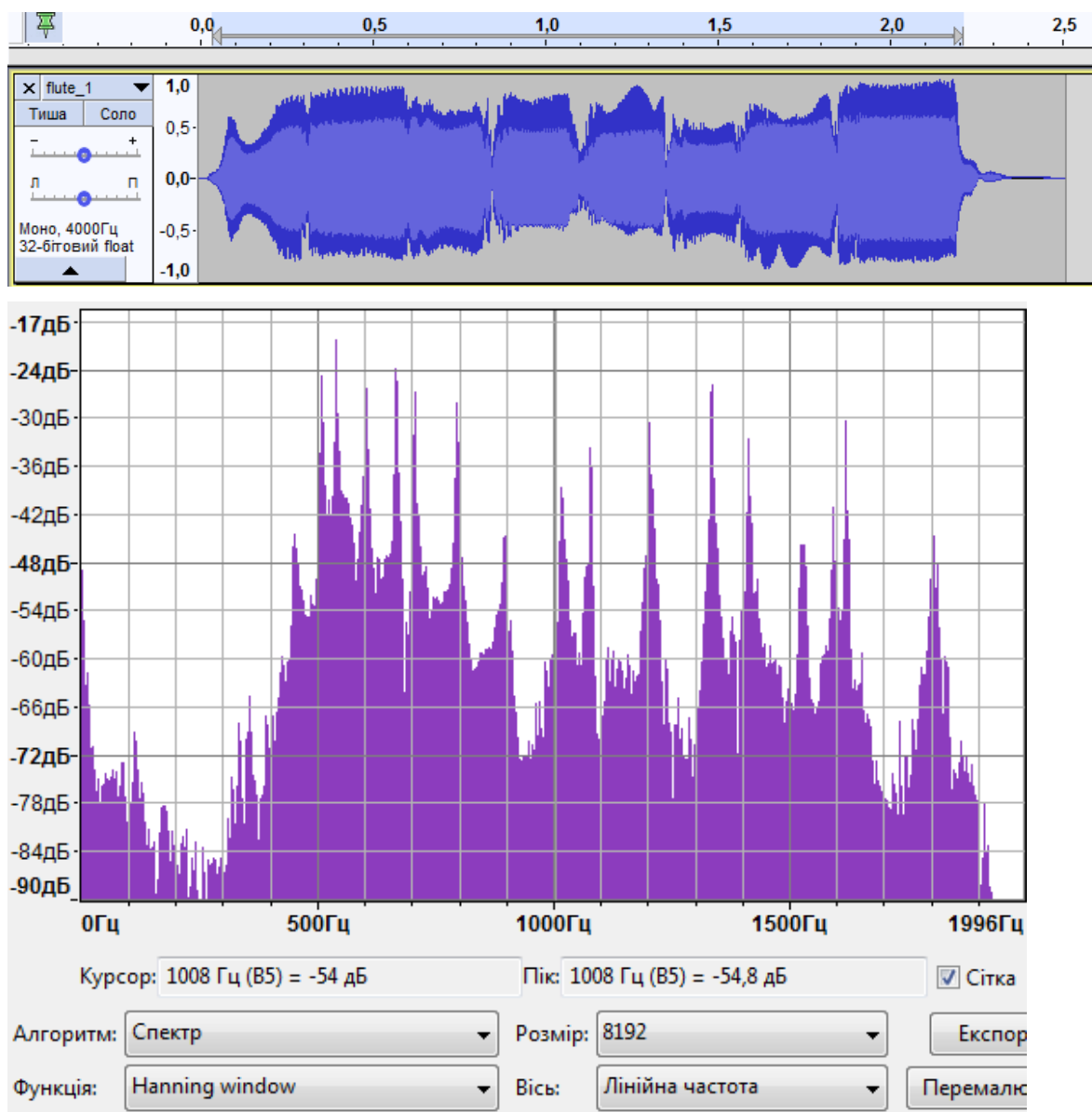


Рис. 5 Форма сигналу в кінці сигналу

Далі наведено графіки цього ж сигналу та його спектру, отримані за допомогою програми Audacity.



Далі розглянемо ці ж графіки, зменшивши частоту дискретизації F_s з 8кГц до 4 кГц:



Як видно за отриманим графіком спектру сигналу, зменшення частоти F_s до 4 кГц не слід робити, оскільки при $F_s = 8$ кГц дискретні складові спектру (обертони) тягнуться аж до 4 кГц. При зменшенні F_s до 4 кГц ця інформація про ці обертона стає недоступною для спостереження.

Команди Матлаб побудови спектру сигналу мають наступний вигляд:

```
[x,Fs] = audioread('flute_1.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

Графік спектру показано на рис. 6.

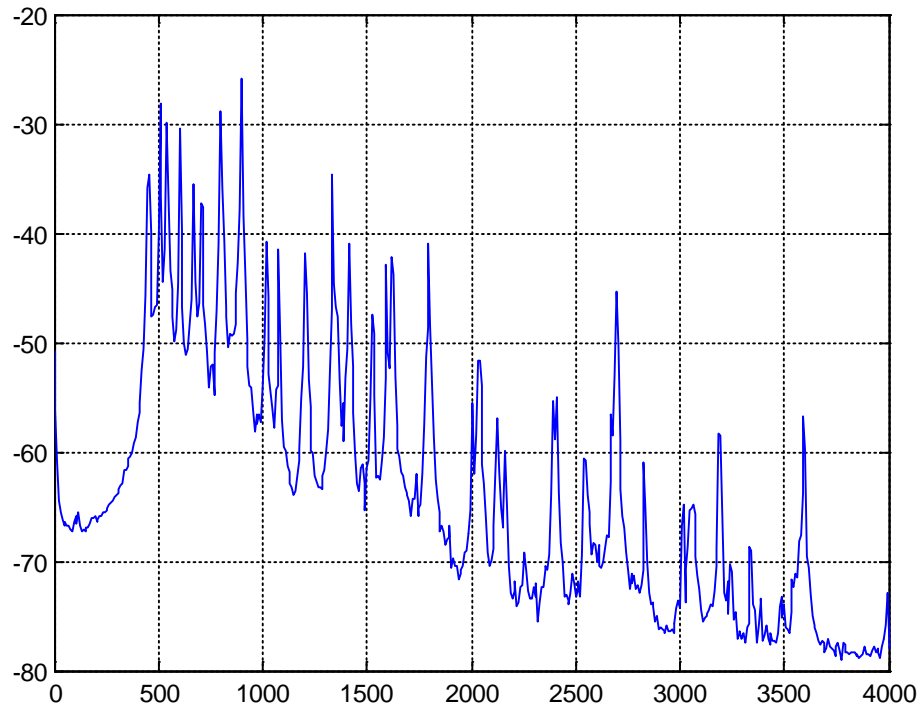


Рис. 6 Спектр сигналу гами від ноти Ля 1-ої октави до ноти Ля 2-ої октави

Отримано оцінку спектра, побудовану за допомогою Matlab, і видно, що вона співпадає з оцінкою спектра, побудованою за допомогою програми Audacity. Слід сказати, що спектр послідовності звуків не дуже цікавий, оскільки він фактично є сумою спектрів окремих звуків. Тому зроблено наступний крок – спектральний аналіз окремих звуків.

Запис ноти Ля першої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')
```

recordblocking(recObj, 2);

```
disp('End of Recording.');
```

la = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);  
plot(la);  
grid on  
audiowrite('la_1.wav',la,8000);
```

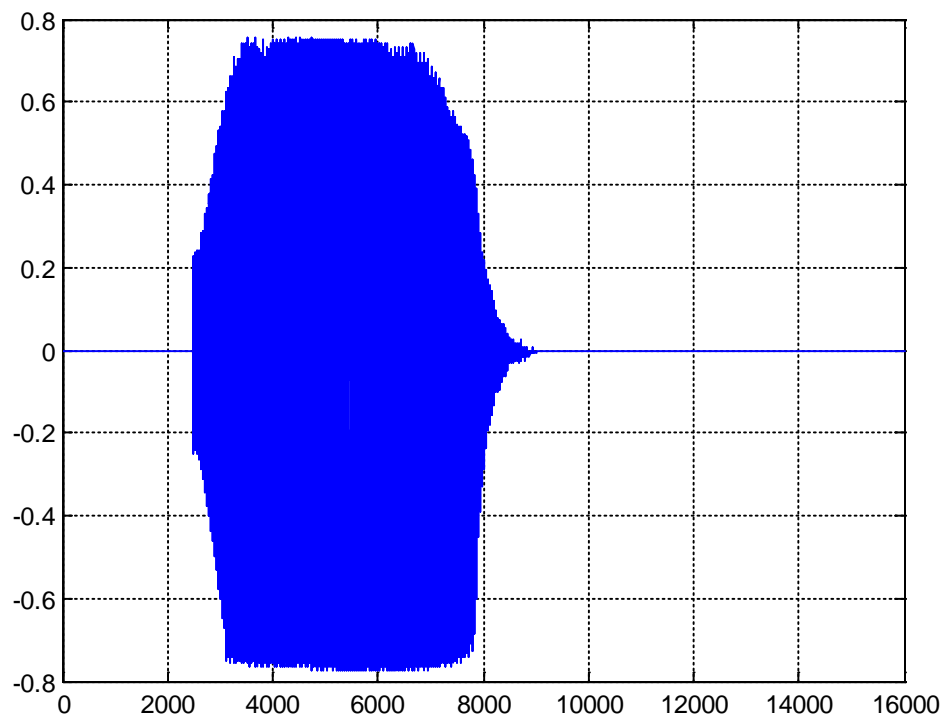


Рис. 7 Розгортка сигналу в часі ноти Ля 1-ої октави

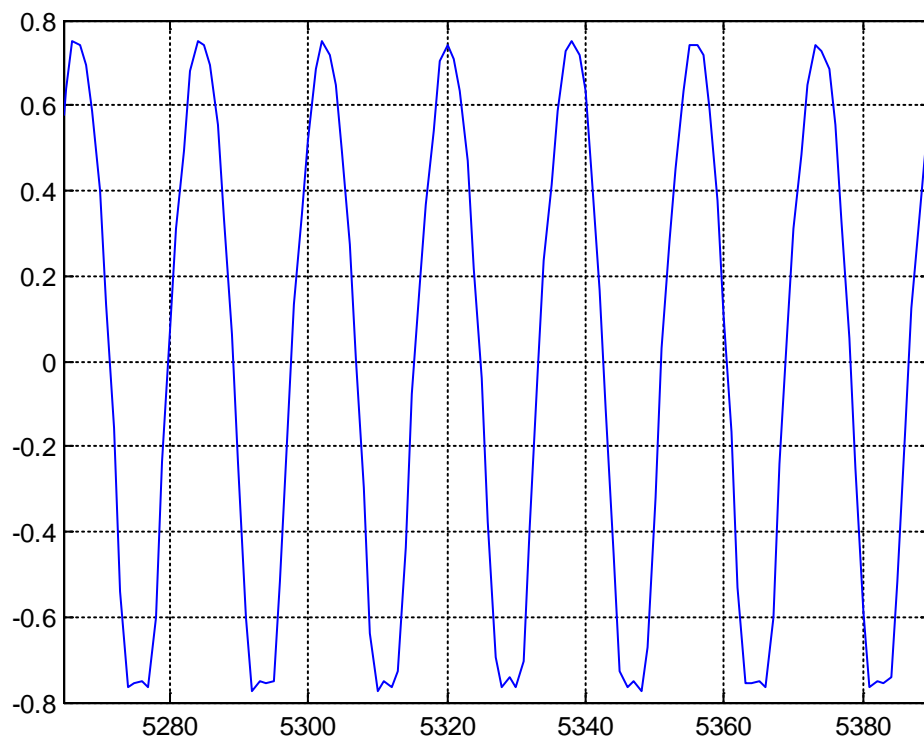


Рис. 8 Форма сигналу ноти Ля 1-ої октави

За графіком форми сигналу невеликого фрагменту видно періодичну послідовність.

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('la_1.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

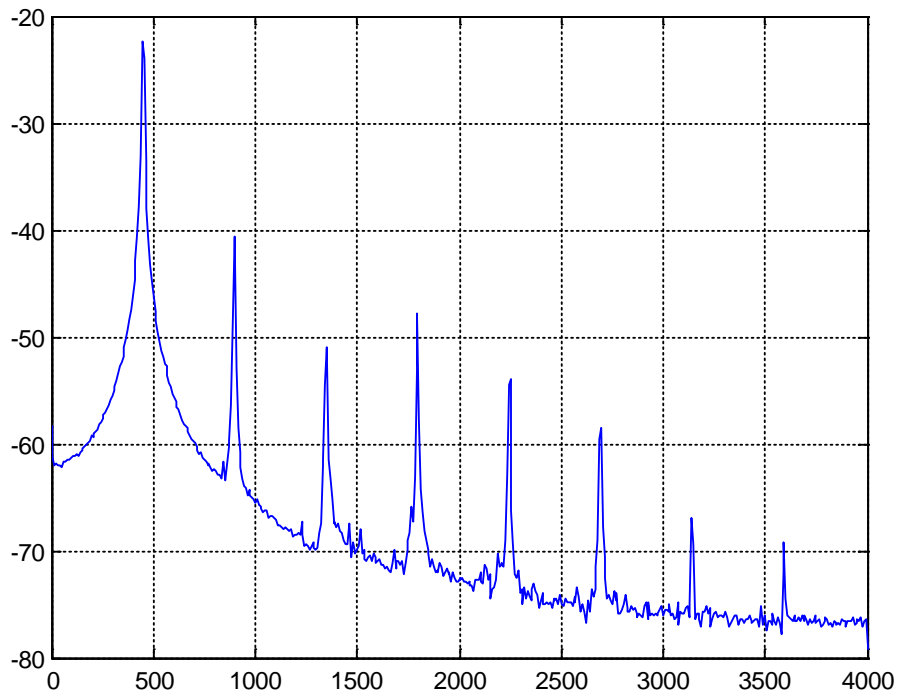


Рис. 9 Спектр сигналу ноти Ля 1-ої октави

За графіком отриманого спектру сигналу бачимо, що перший пік знаходиться на частоті 440 Гц, інші піки знаходяться на кратних частотах. Їх наявність свідчить про досить багатий тембр звуку.

Запис ноти Сі першої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')  
recordblocking(recObj, 2);  
disp('End of Recording.');
```

si = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(si);
grid on
audiowrite('si_1.wav',si,8000);

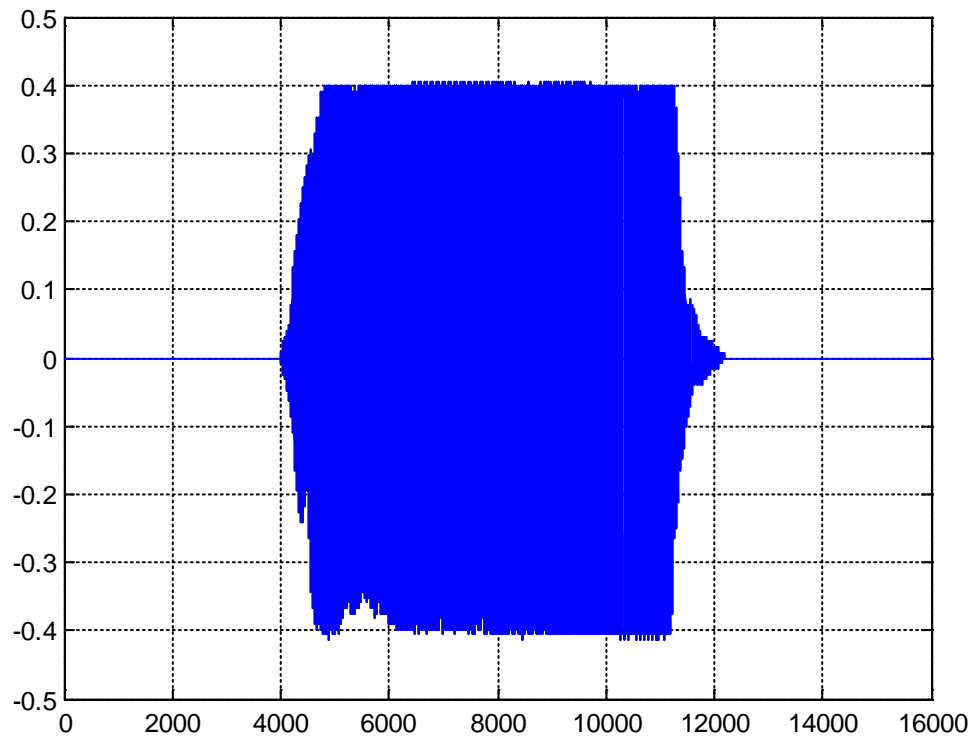


Рис. 10 Розгортка сигналу в часі ноти Сі 1-ої октави

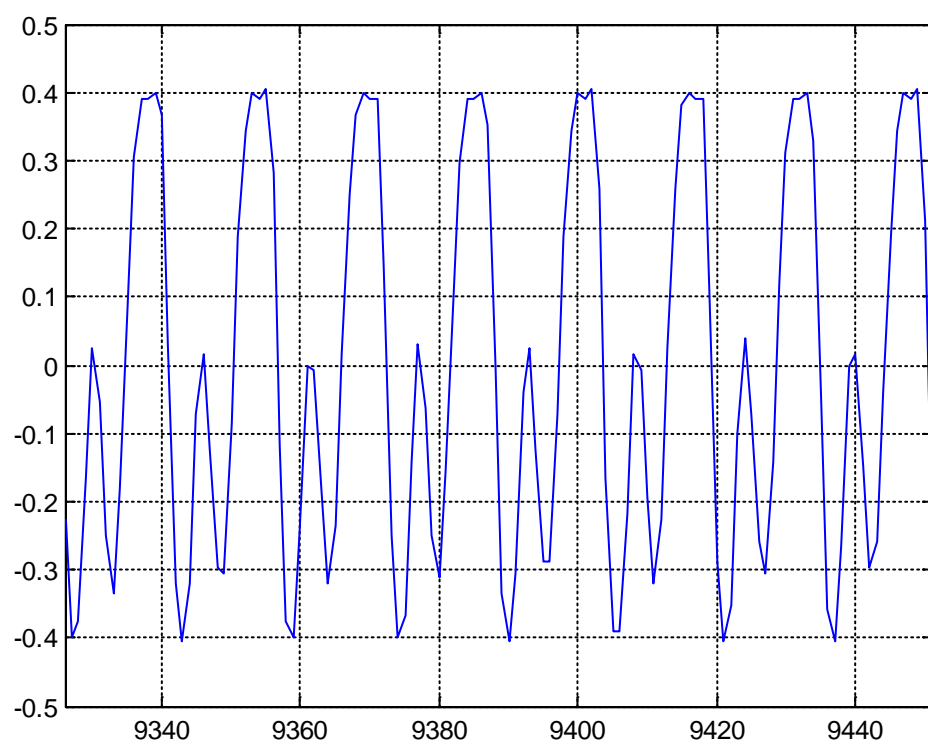


Рис. 11 Форма сигналу ноти Сі 1-ої октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('si_1.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

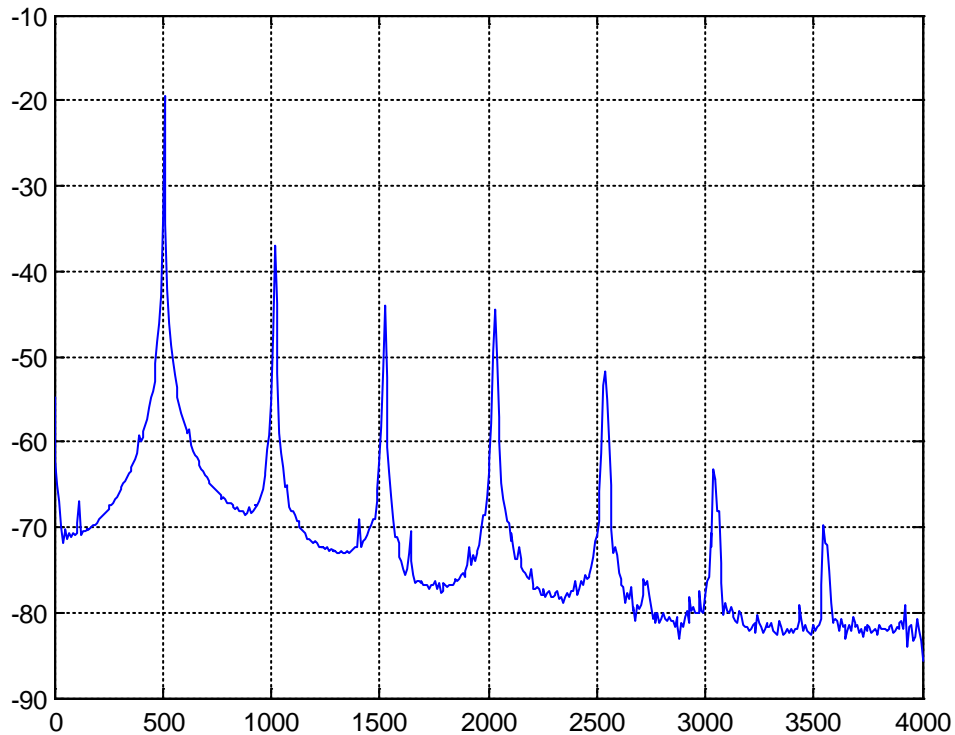


Рис. 12 Спектр сигналу ноти Сі 1-ої октави

За графіком отриманого спектру сигналу можна зробити аналогічні висновки, як до попереднього спектру звуку ля 1-ї октави.

Запис ноти До другої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')  
recordblocking(recObj, 2);  
disp('End of Recording.');
```

do = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(do);
grid on
audiowrite('do_2.wav',do,8000);

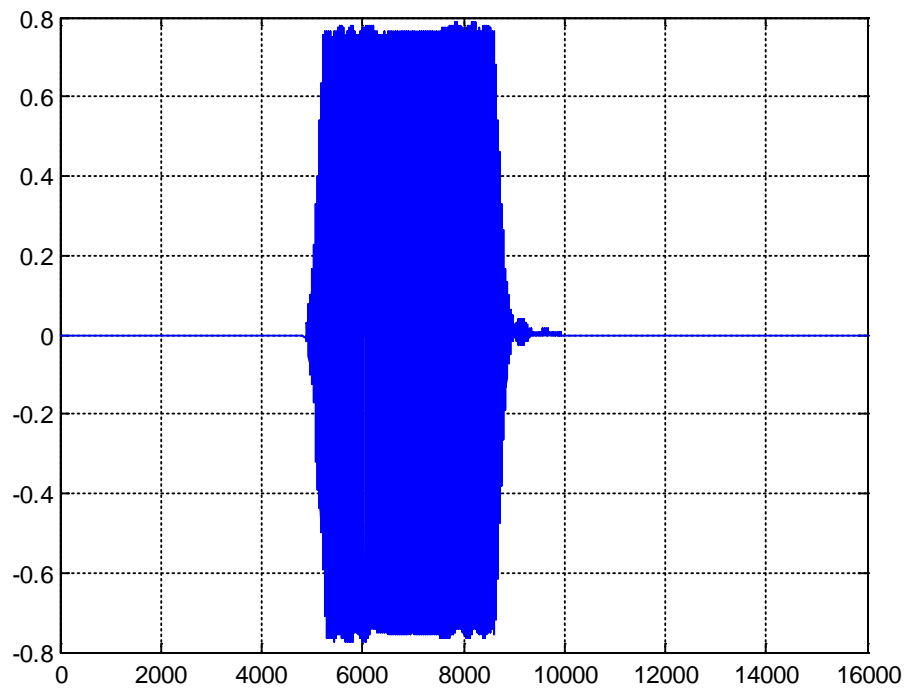


Рис. 13 Розгортка сигналу в часі ноти До 2-ої октави

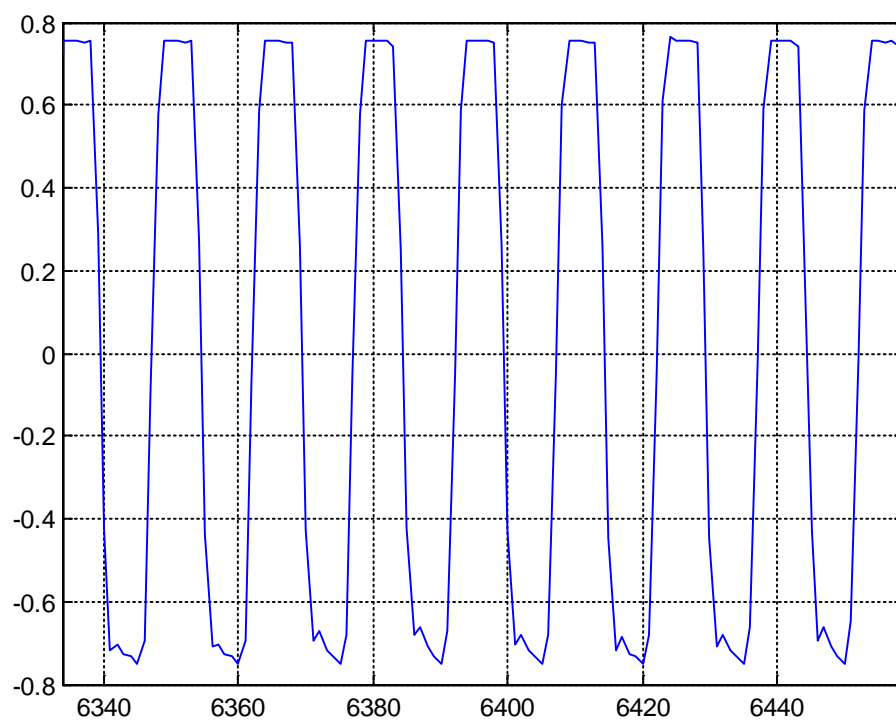


Рис. 14 Форма сигналу ноти До 2-ї октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('do_2.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

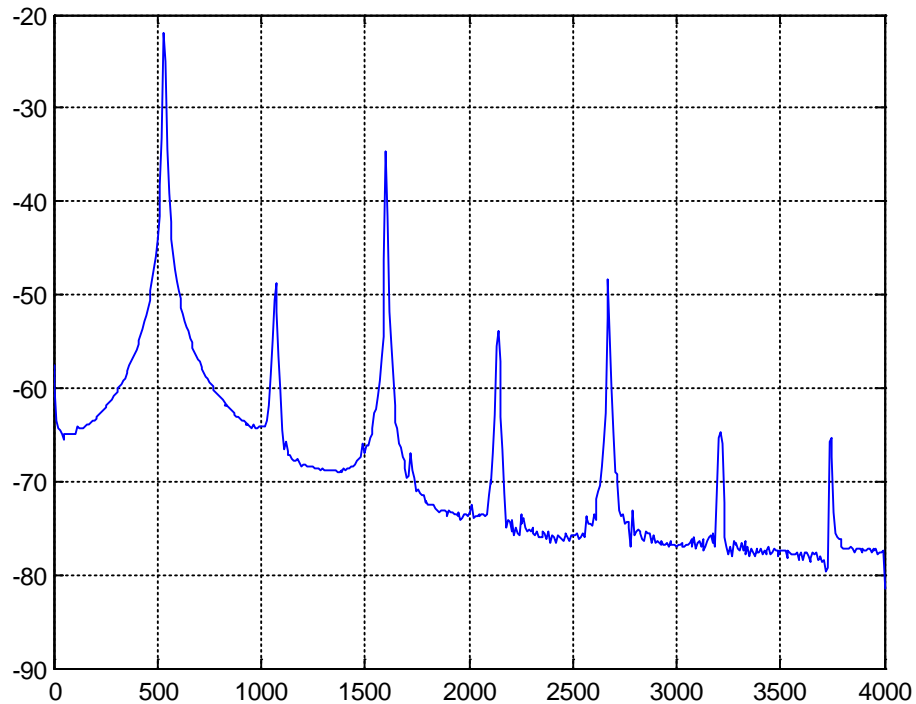


Рис. 15 Спектр сигналу ноти До 2-ої октави

В отриманому спектрі гармоніки із парними номерами (основний тон нумеруємо як №1), мають менший рівень, ніж гармоніки із непарними номерами.

Запис ноти Ре другої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')
```

recordblocking(recObj, 2);

```
disp('End of Recording.');
```

re = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);  
plot(re);  
grid on  
audiowrite('re_2.wav',re,8000);
```

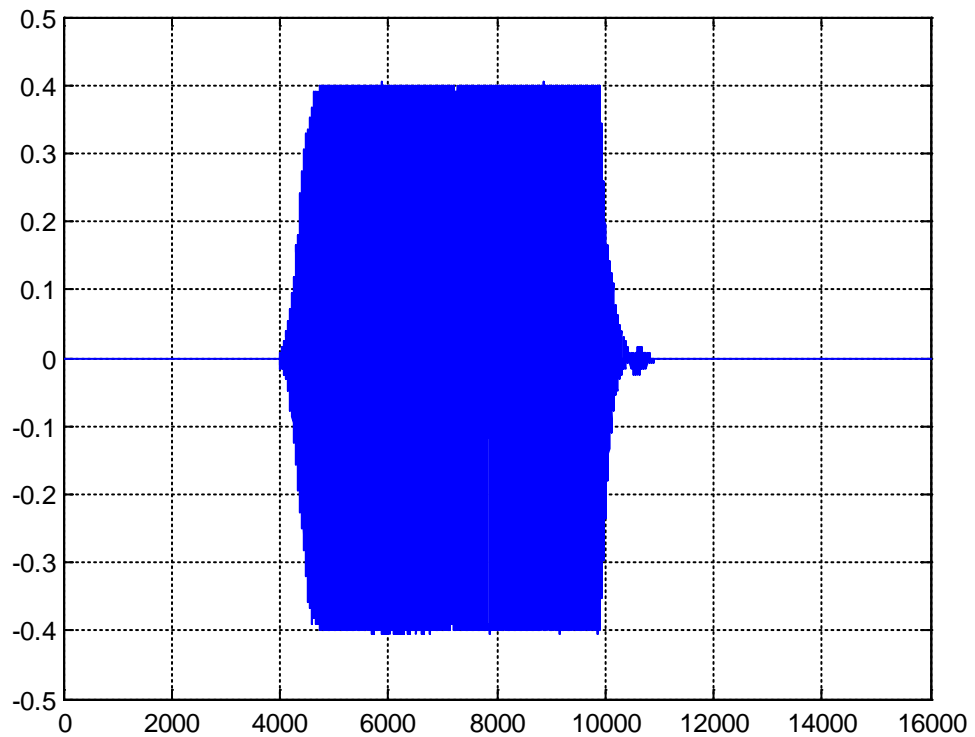


Рис. 16 Розгортка сигналу в часі ноти Ре 2-ої октави

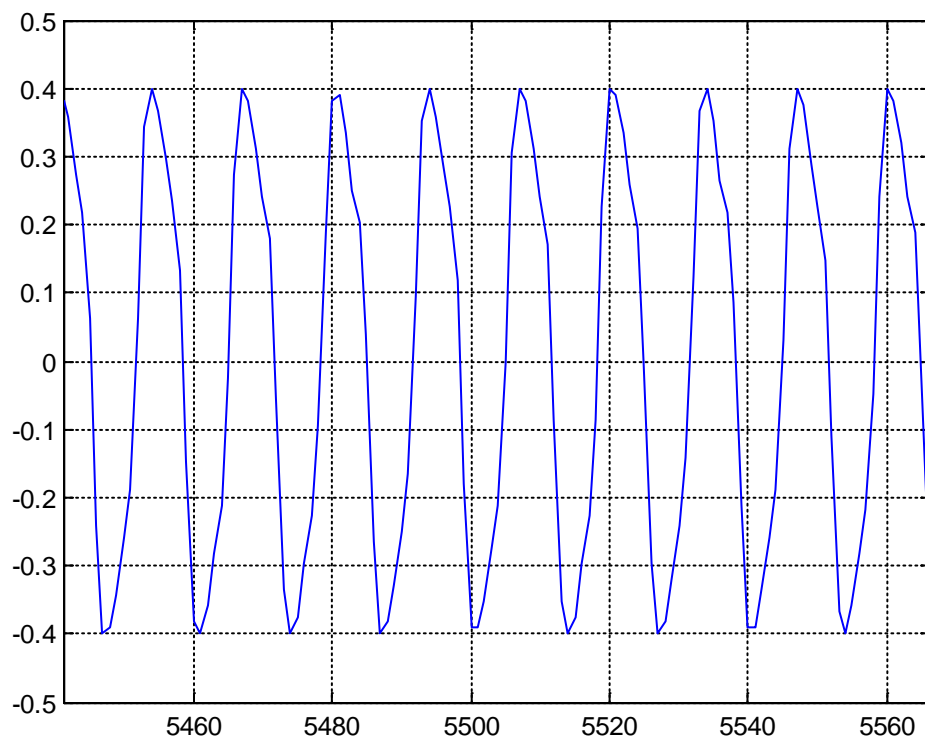


Рис. 17 Форма сигналу ноти Ре 2-ї октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('re_2.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

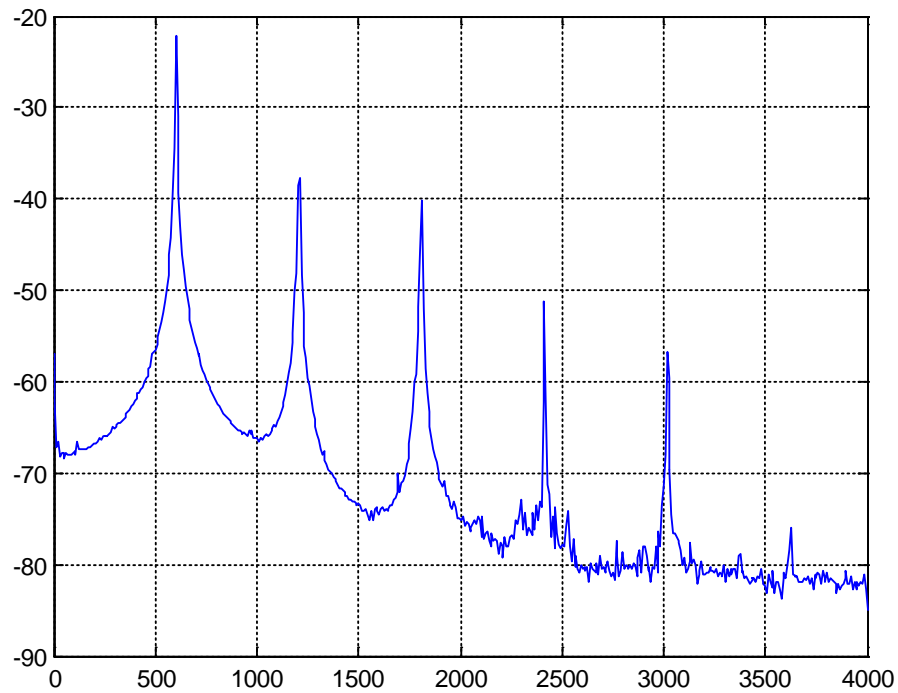


Рис. 18 Спектр сигналу ноти Ре 2-ої октави

В отриманому спектрі особливостей не помічається – висновки аналогічні як для ноти ля 1-ї октави.

Запис ноти Мі другої октави:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

mi = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);
plot(mi);
grid on
audiowrite('mi_2.wav',mi,8000);
```

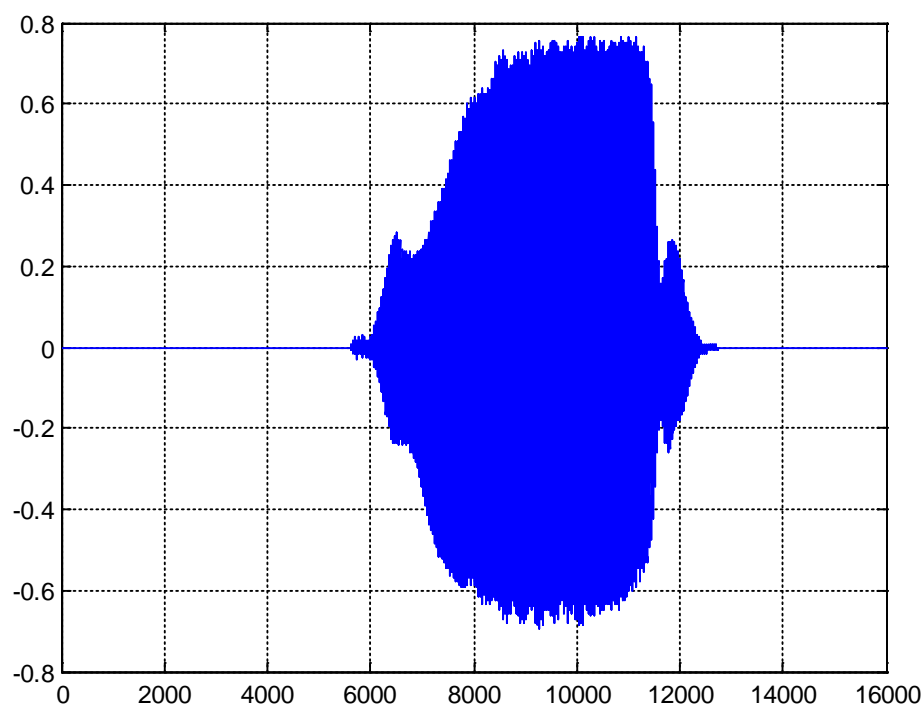


Рис. 19 Розгортка сигналу в часі ноти Мі 2-ої октави

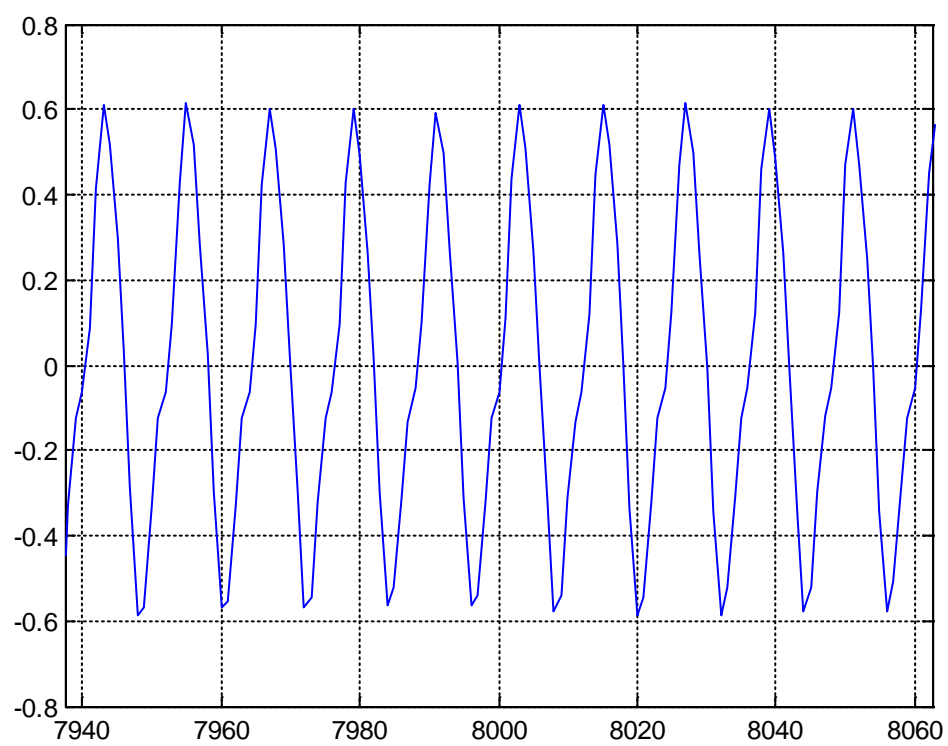


Рис. 20 Форма сигналу ноти Мі 2-ої октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('mi_2.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

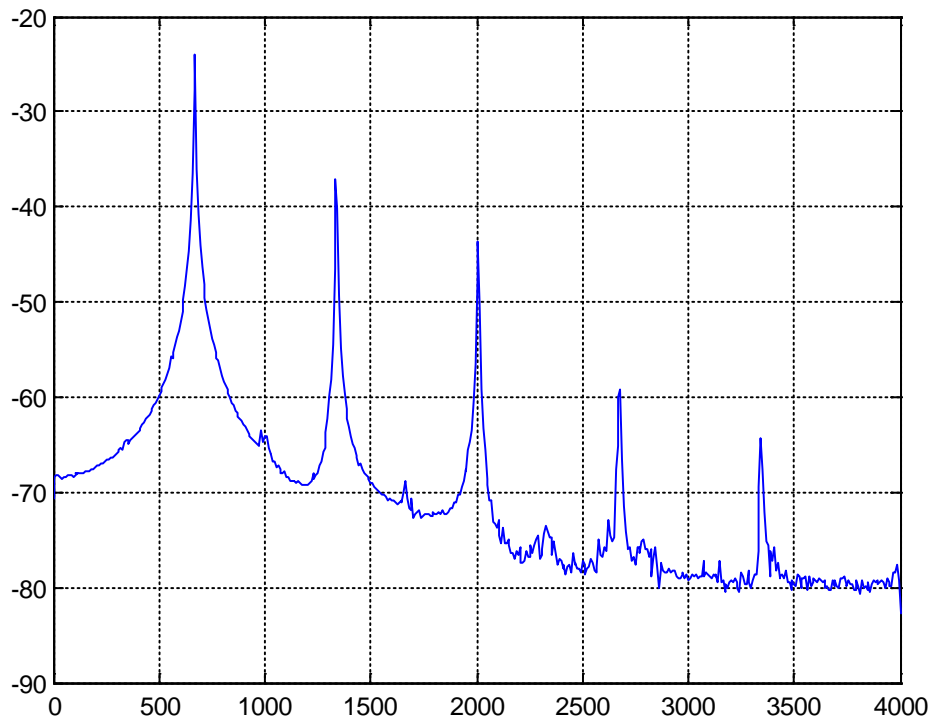


Рис. 21 Спектр сигналу ноти Мі 2-ої октави

В спектрі намічається цікава особливість – маленькі сплески між основними спектральними піками. Їх потужність невелика, тому на тембрі це не має відбитися. Але тенденція до зміни тембру є – і це вже цікаво.

Запис ноти Фа другої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')
```

recordblocking(recObj, 2);

```
disp('End of Recording.');
```

fa = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);  
plot(fa);  
grid on  
audiowrite('fa_2.wav',fa,8000);
```

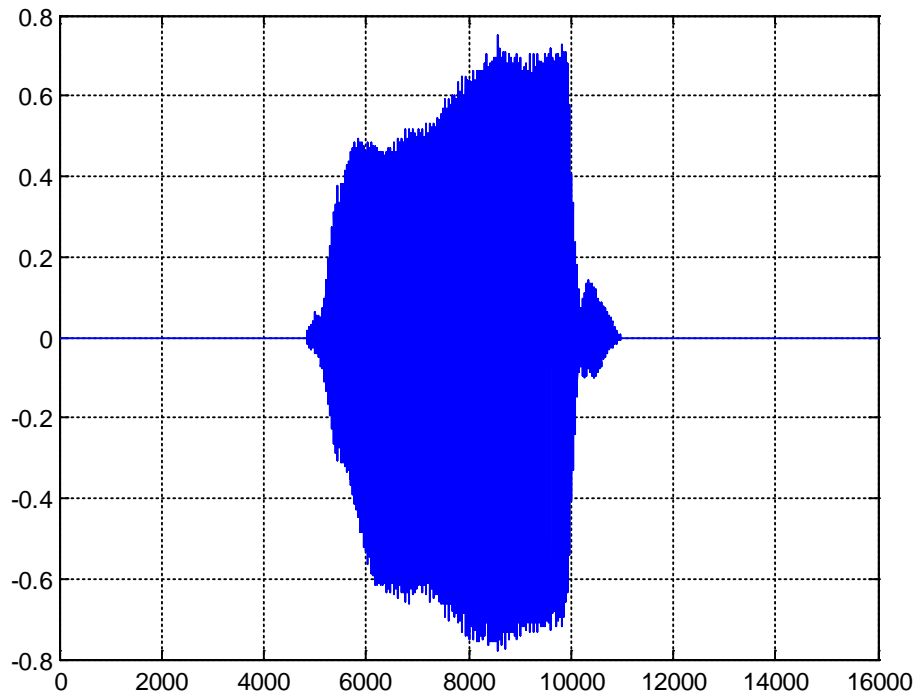


Рис. 22 Розгортка сигналу в часі ноти Фа 2-ої октави

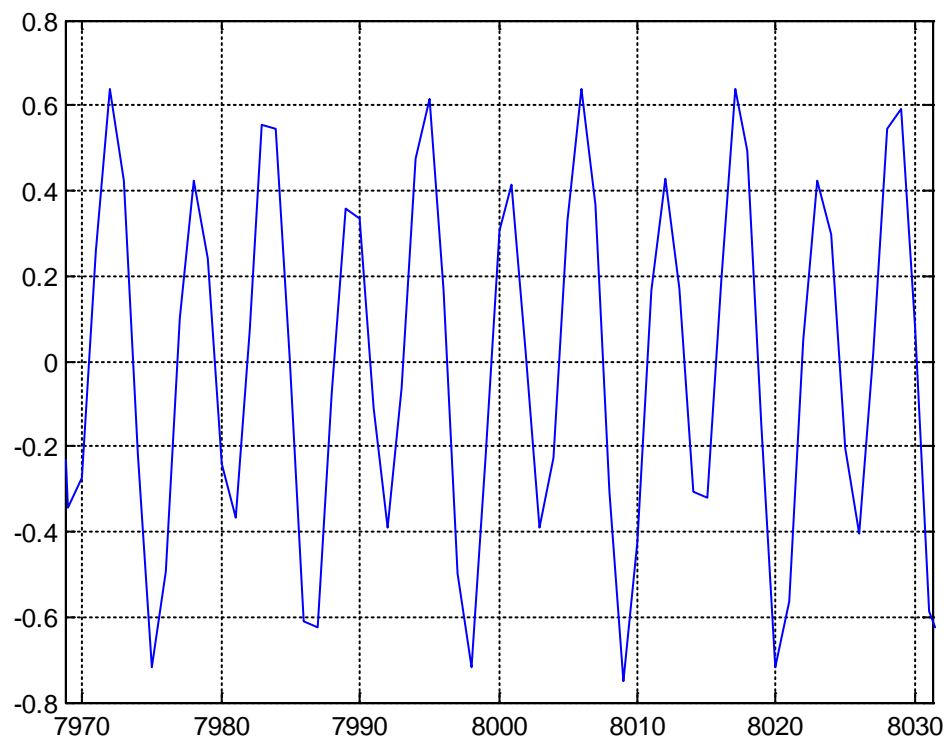


Рис. 23 Форма сигналу ноти Фа 2-ої октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('fa_2.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

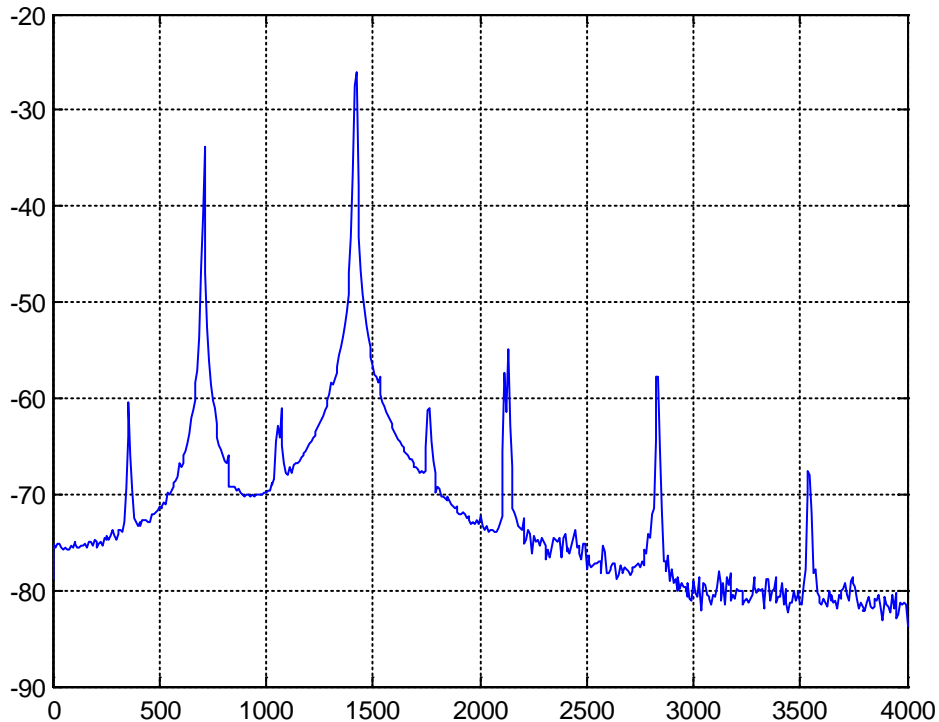


Рис. 24 Спектр сигналу ноти Фа 2-ої октави

Спостерігається цікавий графік спектру. По-перше, тенденція до зміни тембру тут є наявною – між основними сплесками спектру з'явилися досить виразні додаткові сплески. Також цікаво, що форма сигналу є трохи «рогатою».

По-друге, спостерігаємо явище резонансу, завдяки якому рівень другого спектрального піку (приблизно 1400 Гц) є значно вищим (на 6-7 дБ) за рівень першого основного піку (приблизно 700 Гц). Як результат – звук має стати дещо «пронизливим».

Запис ноти Соль другої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')  
recordblocking(recObj, 2);  
disp('End of Recording.');
```

sol = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(sol);
grid on
audiowrite('sol_2.wav',sol,8000);

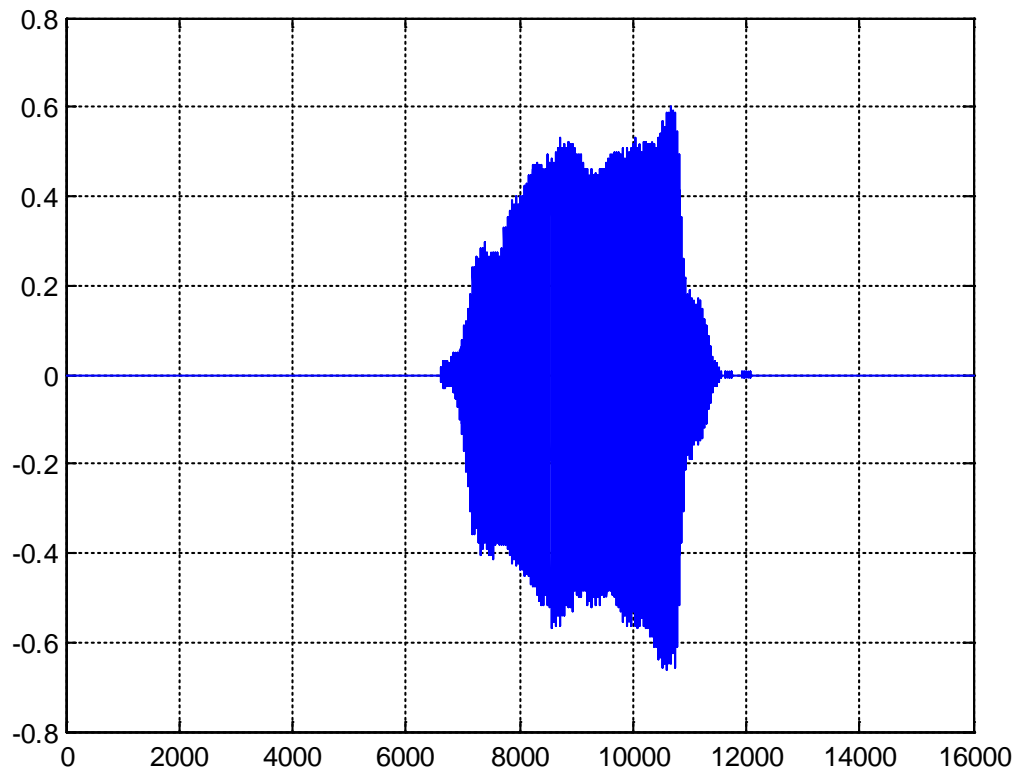


Рис. 25 Розгортка сигналу в часі ноти Соль 2-ої октави

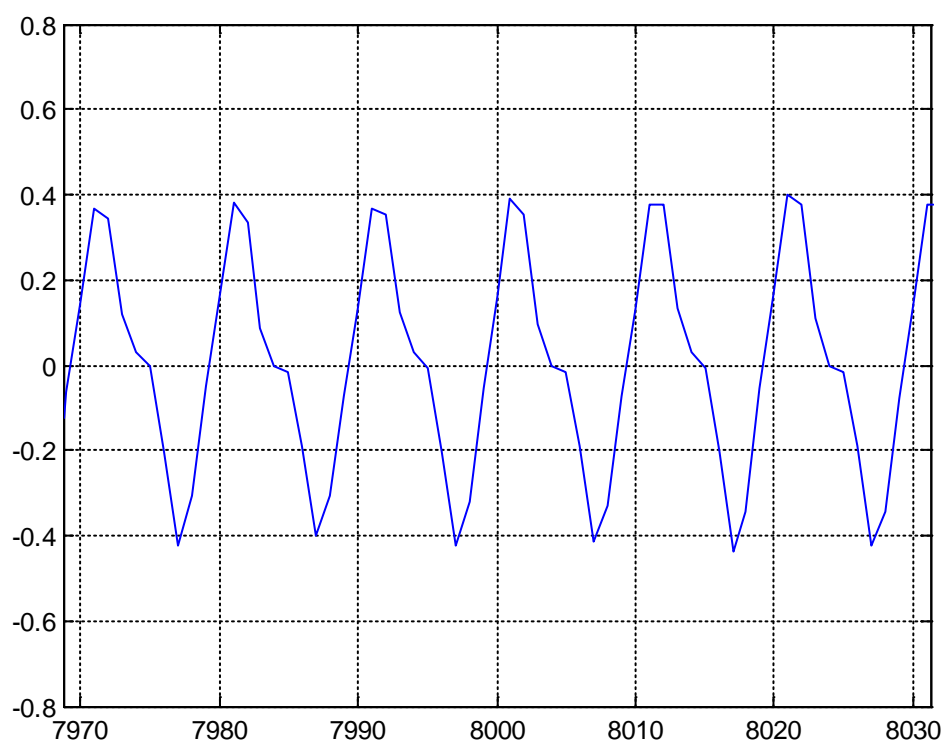


Рис. 26 Форма сигналу ноти Соль 2-ї октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('sol_2.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

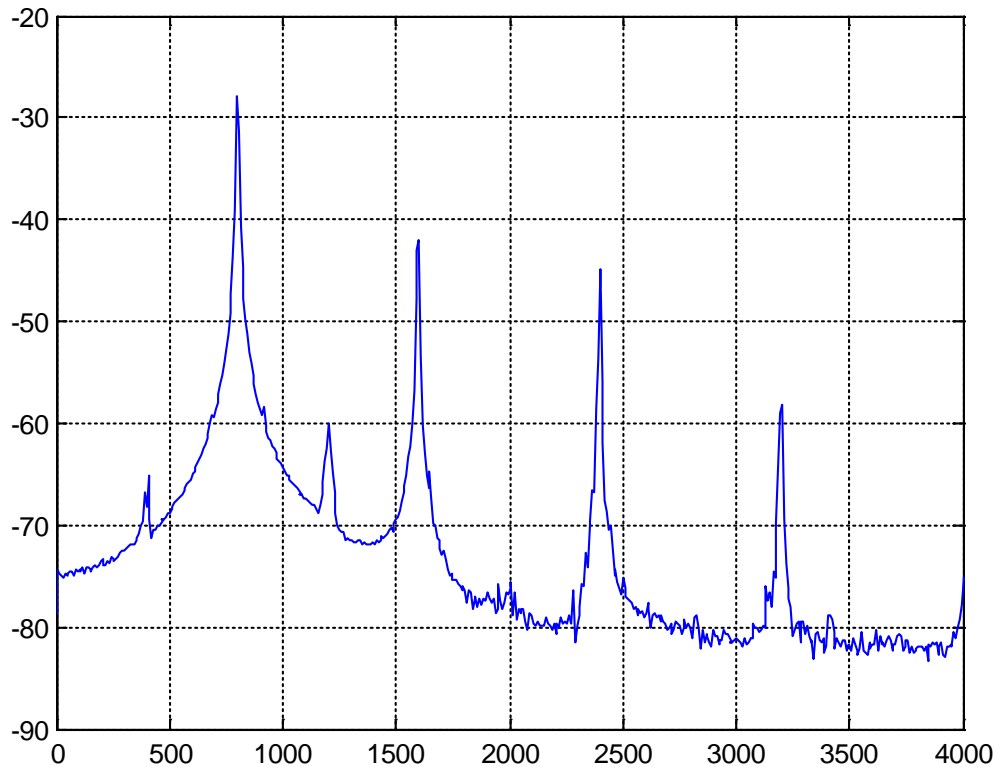


Рис. 27 Спектр сигналу ноти Соль 2-ої октави

Ситуація знову повертається до «стандартної» - проміжні спектральні піки зменшуються, тембр повертається до «типового» тембру, тобто подібного до тембру звука ля 1-ї октави.

Запис ноти Ля другої октави:

```
clc,clear  
recObj = audiorecorder;  
disp('Start speaking.')  
recordblocking(recObj, 2);  
disp('End of Recording.');
```

la = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(la);
grid on
audiowrite('la_2.wav',la,8000);

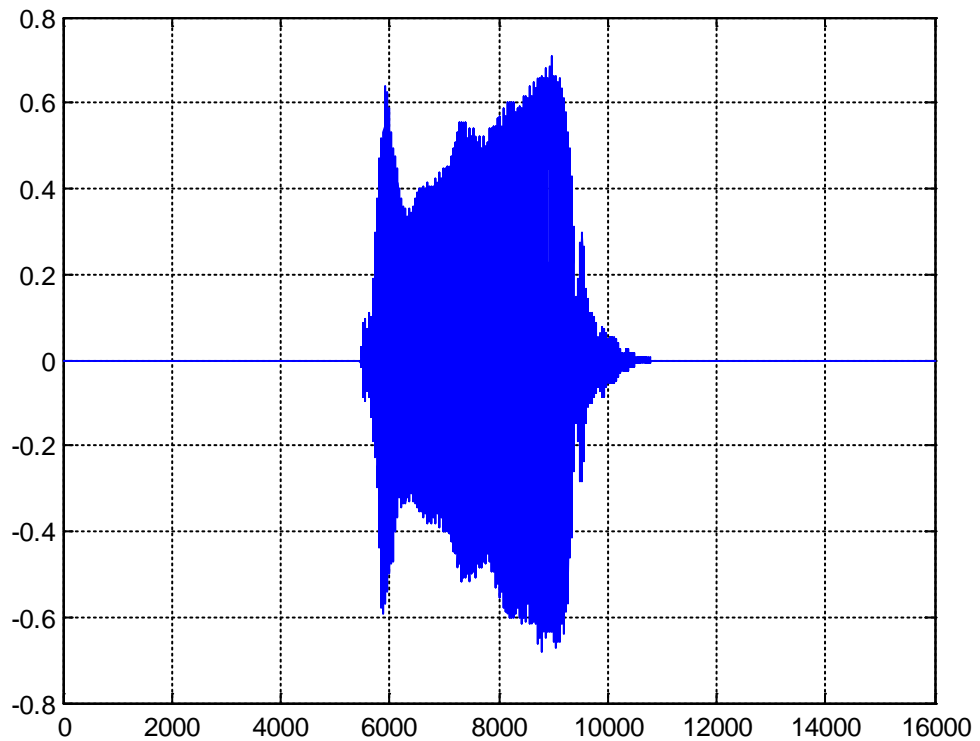


Рис. 28 Розгортка сигналу в часі ноти Ля 2-ої октави

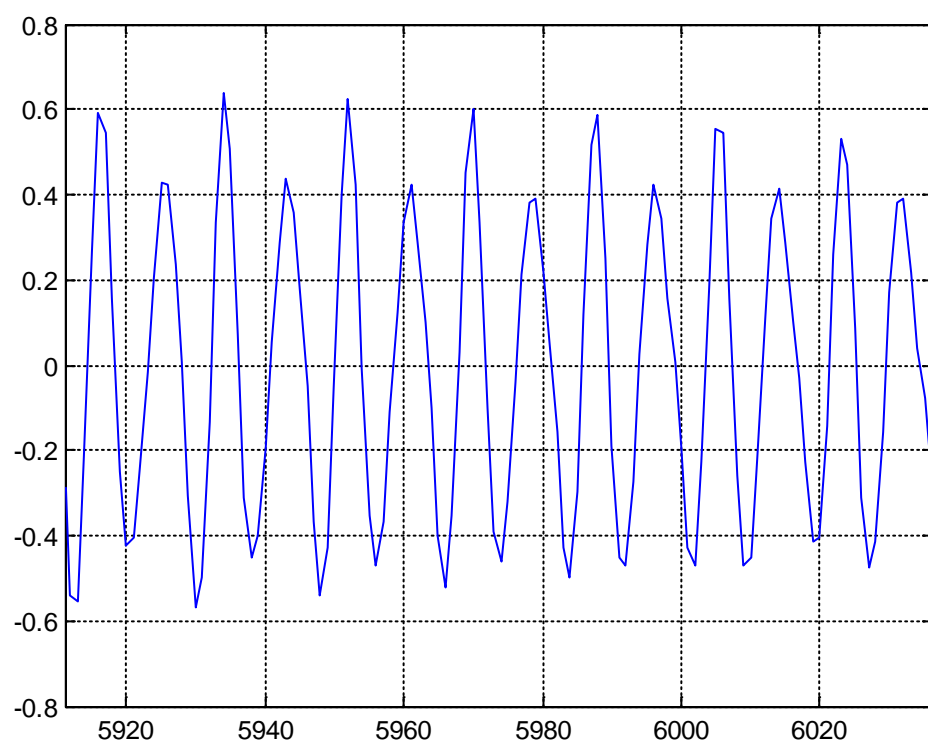


Рис. 29 Форма сигналу ноти Ля 2-ої октави

Побудова спектру сигналу:

```
[x,Fs] = audioread('la_2.wav');  
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);  
figure; plot(f,10*log10(Pxx));  
grid on;
```

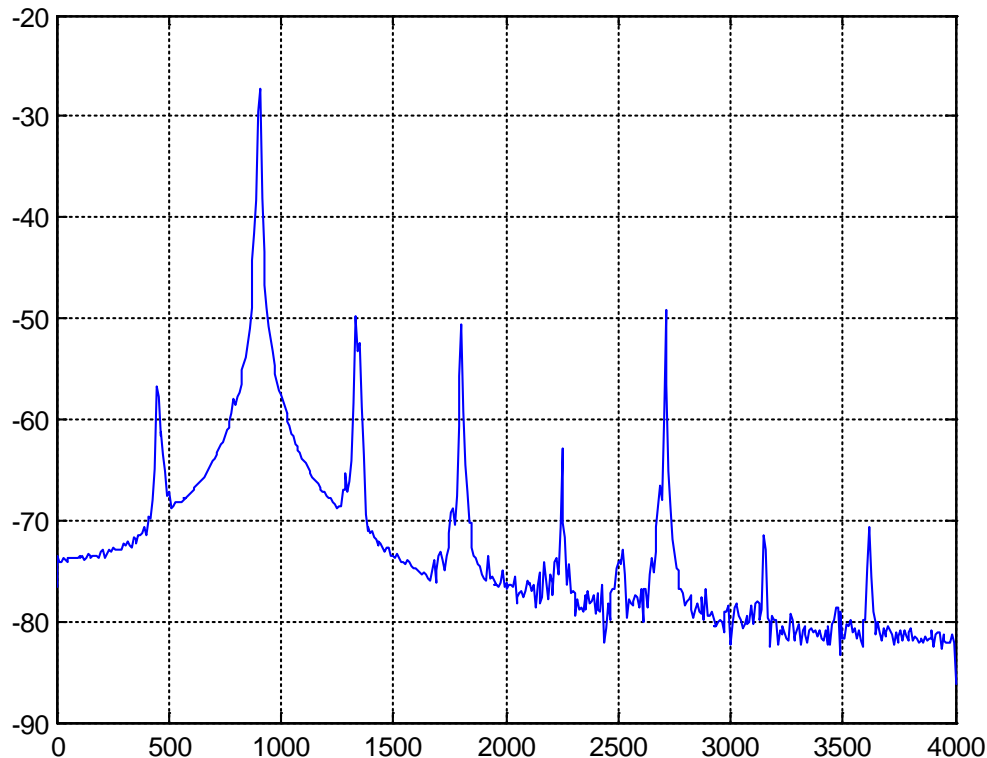


Рис. 30 Спектр сигналу ноти Ля 1-ої октави

За графіком спектру знову спостерігаються проміжні спектральні сплески є не меншими, ніж сплески обертонів. Тому слід знову чекати зміни тембру.

Підсумовуючи, можна сказати, що спектр звуків флейти в межах однієї октави суттєво змінює свою форму із переходом від одного звуку до іншого. Ця змінність спектру може бути однією із характеристик музичного інструменту флейти взагалі, або даного конкретного екземпляру флейти. Щоб відповісти на питання, це характерно для даної флейти або для флейт даного виду, наступним кроком зроблено аналіз звуку флейти – піколо.

2.2. Акустична характеристика флейти-піколо

Для аналізу флейти – піколо записано всього 8 нот, із них 7 нот 3-ї октави та 8-ма нота 4-ї октави. Також записано музичний елемент як «трель».

Запис ноти До 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

do = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);
plot(do);
grid on
audiowrite('do.wav',do,8000);
[x,Fs] = audioread('do.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;
```

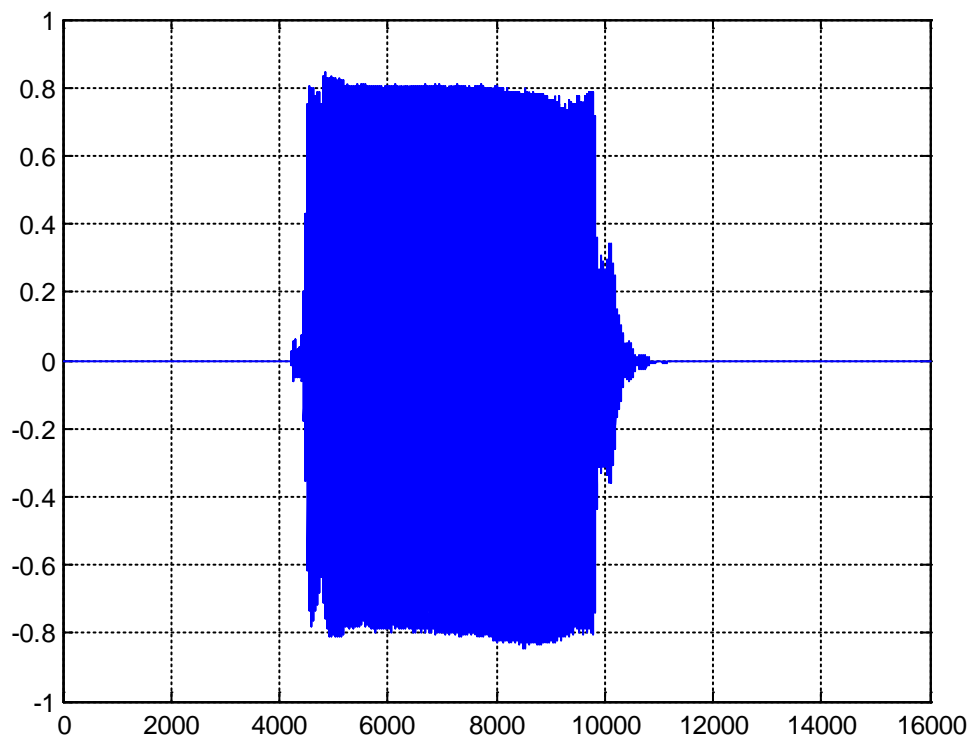


Рис. 31 Розгортка сигналу в часі ноти До 3-ої октави

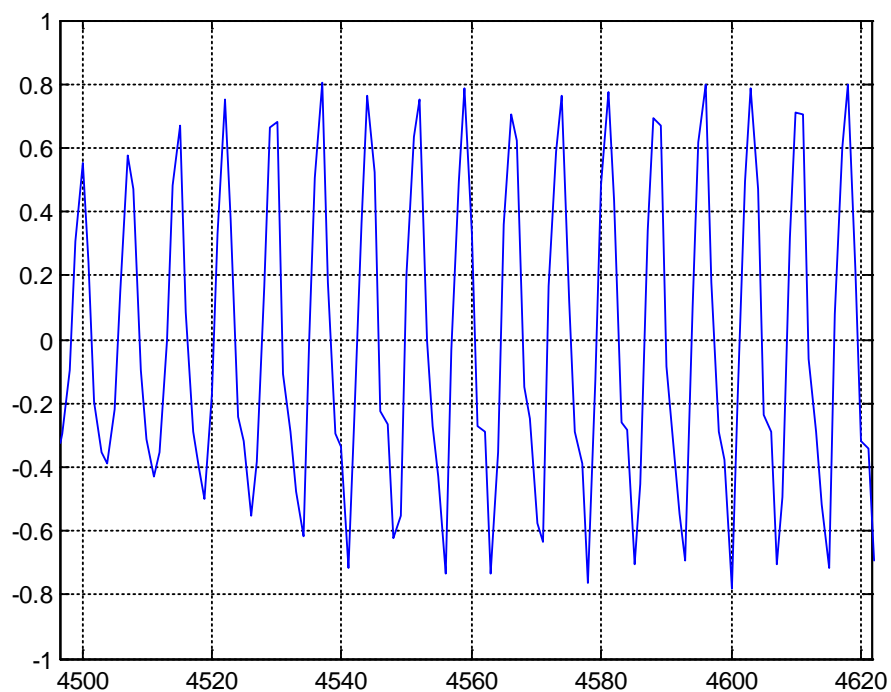


Рис. 32 Форма сигналу ноти До 3-ої октави

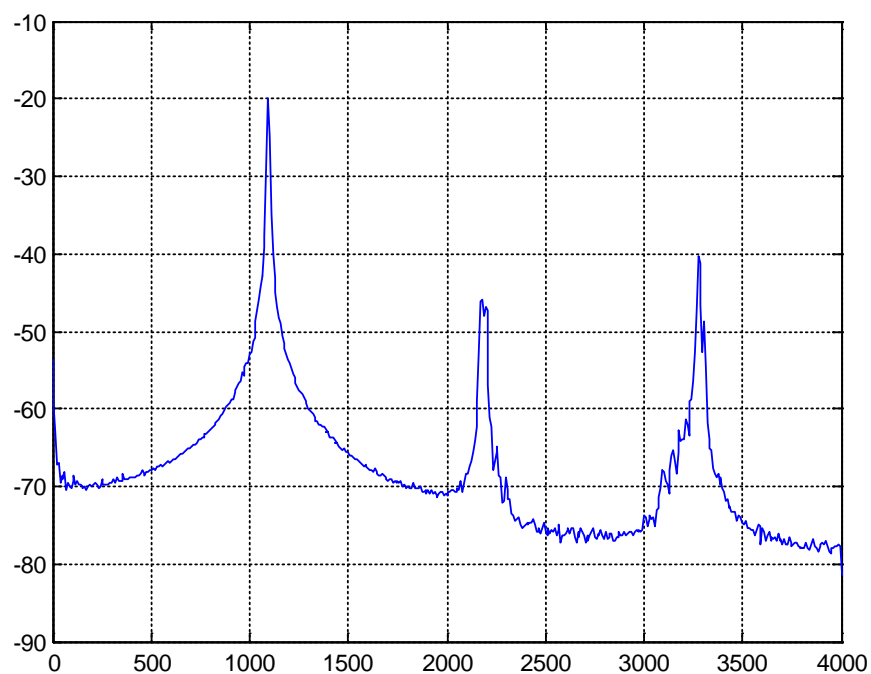


Рис. 33 Спектр сигналу ноти До 3-ої октави

За графіком отриманого спектру сигналу бачимо ситуацію до ноти ля 1-ї октави поперечної флейти, що перший пік знаходиться на частоті 1100 Гц, інші піки знаходяться на кратних частотах. Їх наявність свідчить про багатий тембр звуку флейти – піколо.

Запис ноти Ре 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

```
re = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(re);
grid on
audiowrite('re.wav',re,8000);
[x,Fs] = audioread('re.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;
```

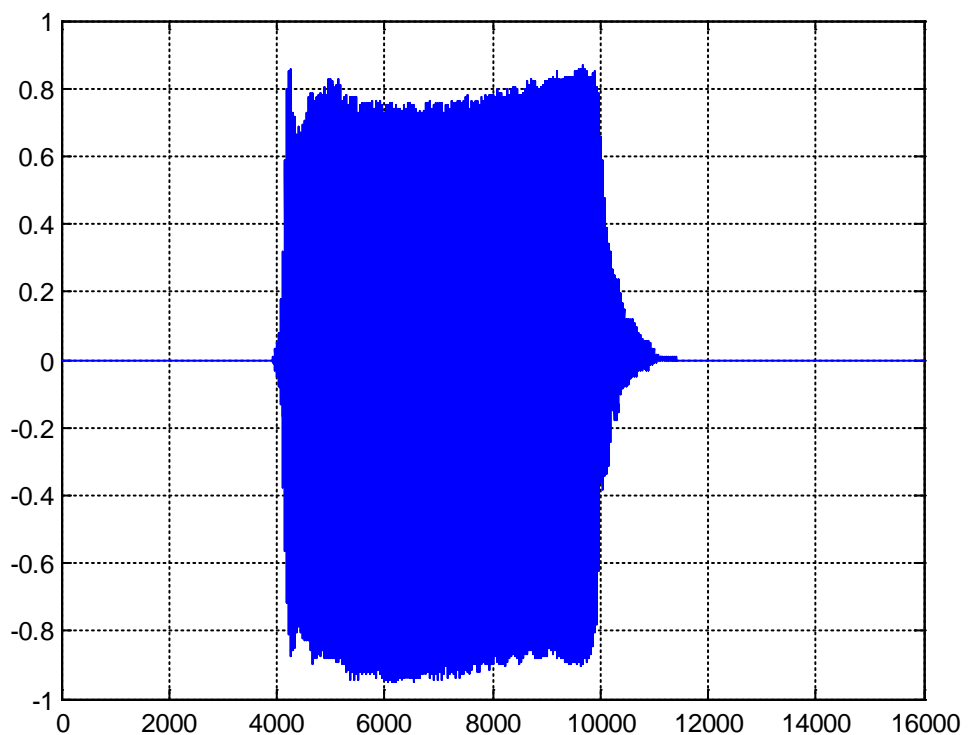


Рис. 34 Розгортка сигналу в часі ноти Ре 3-ої октави

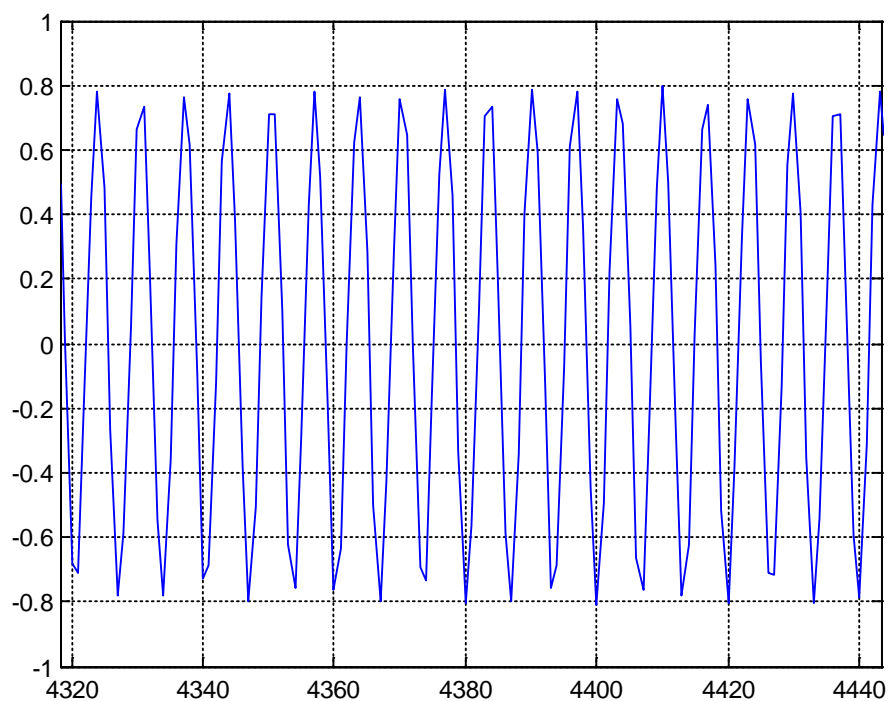


Рис. 35 Форма сигналу ноти Ре 3-ої октави

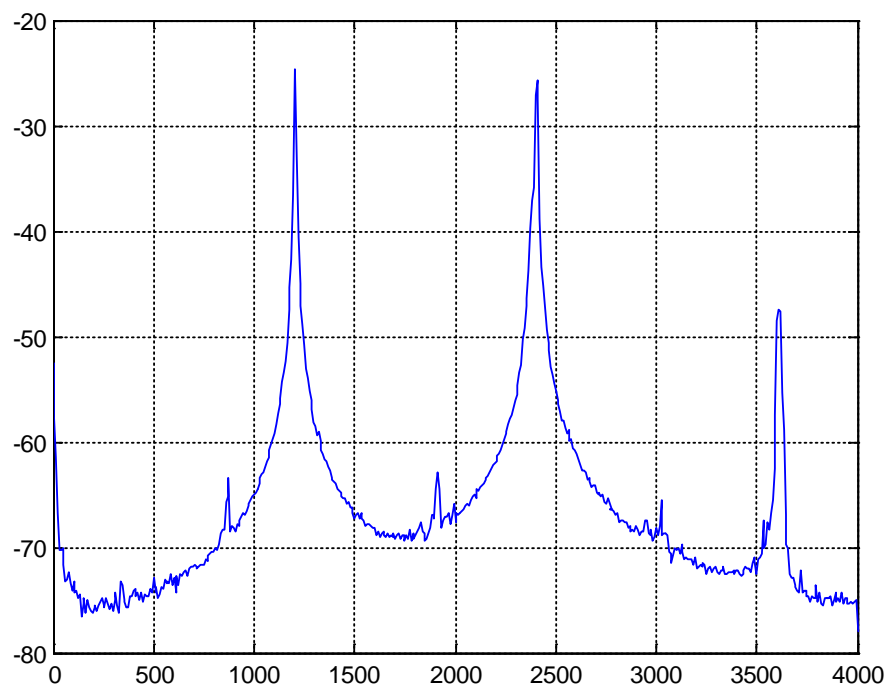


Рис. 36 Спектр сигналу ноти Ре 3-ої октави

В спектрі намічається дві цікаві особливості: маленькі сплески між основними спектральними піками. Їх потужність невелика, тому на тембрі це не відбивається. Та друга особливість – це маємо два спектральні піки.

Запис ноти Мі 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

mi = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(mi);
grid on
audiowrite('mi.wav',mi,8000);
[x,Fs] = audioread('mi.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;

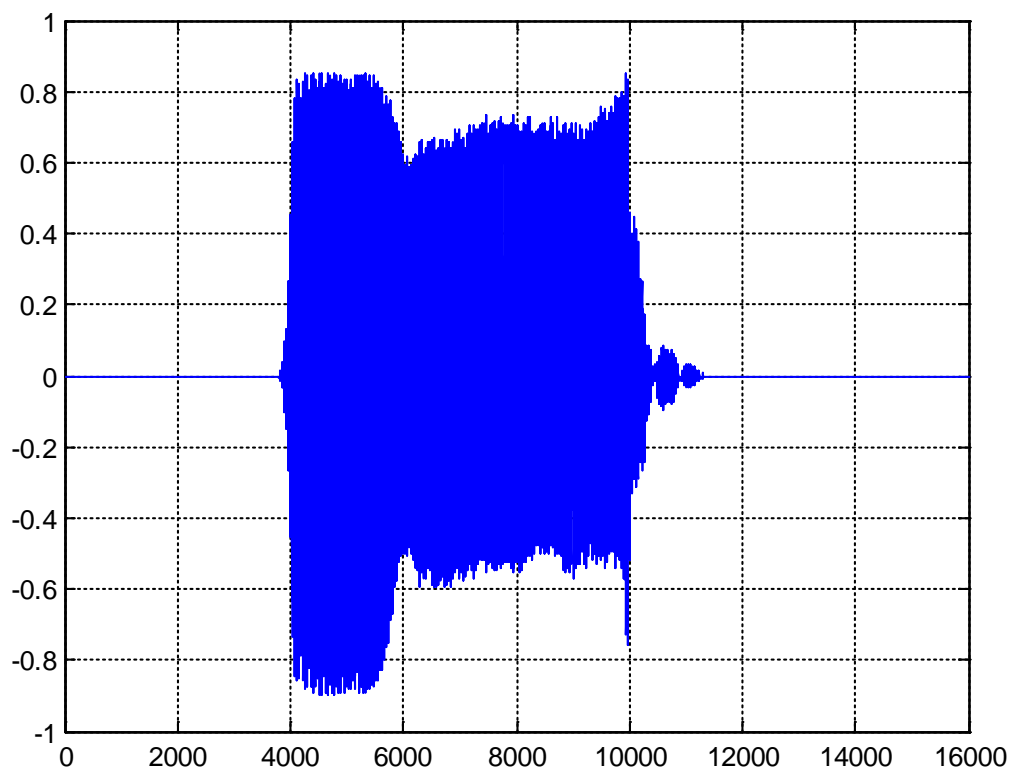


Рис. 37 Розгортка сигналу в часі ноти Мі 3-ої октави

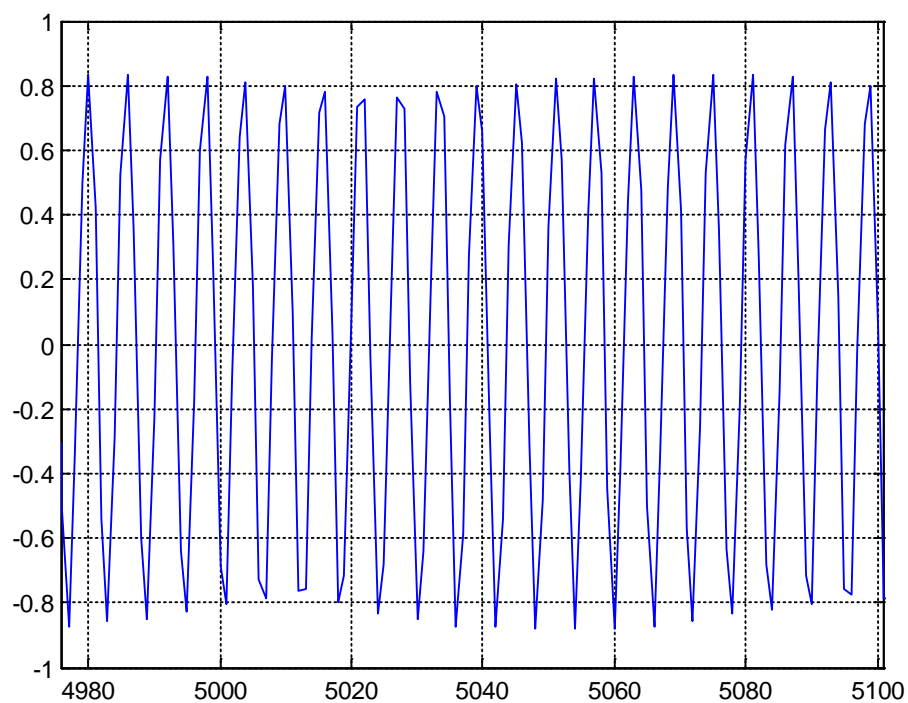


Рис. 38 Форма сигналу ноти Мі 3-ої октави

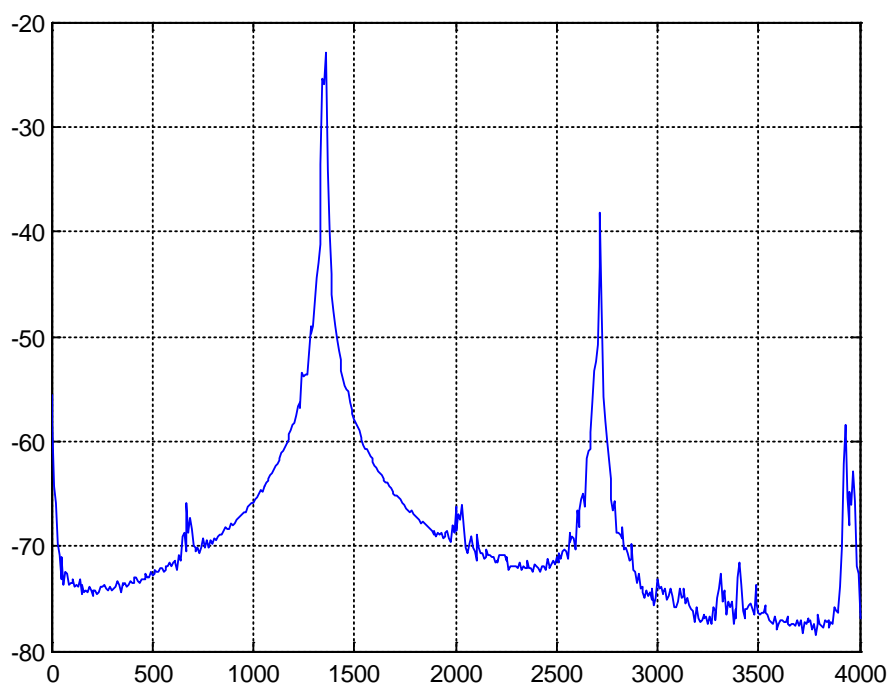


Рис. 39 Спектр сигналу ноти Мі 3-ої октави

За графіком отриманого спектру сигналу бачимо аналогічну ситуацію як до ноти До 3-ї октави. Проміжні спектральні піки зменшуються, тембр повертається до «типового» тембру.

Запис ноти Фа 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

fa = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(fa);
grid on
audiowrite('fa.wav',fa,8000);
[x,Fs] = audioread('fa.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;

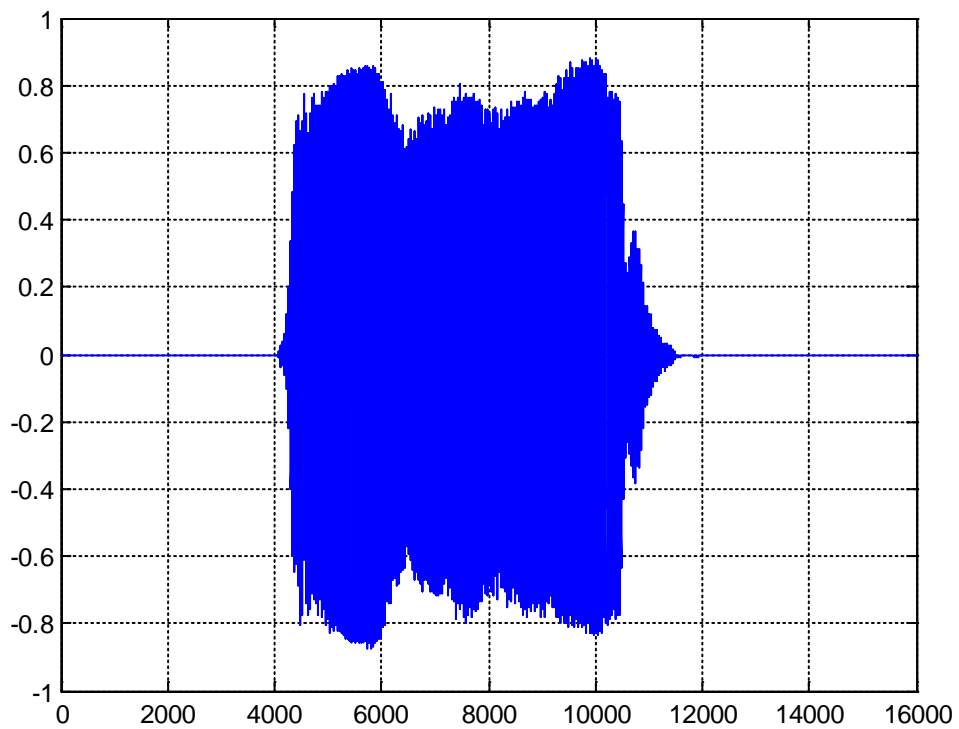


Рис. 40 Розгортка сигналу в часі ноти Фа 3-ої октави

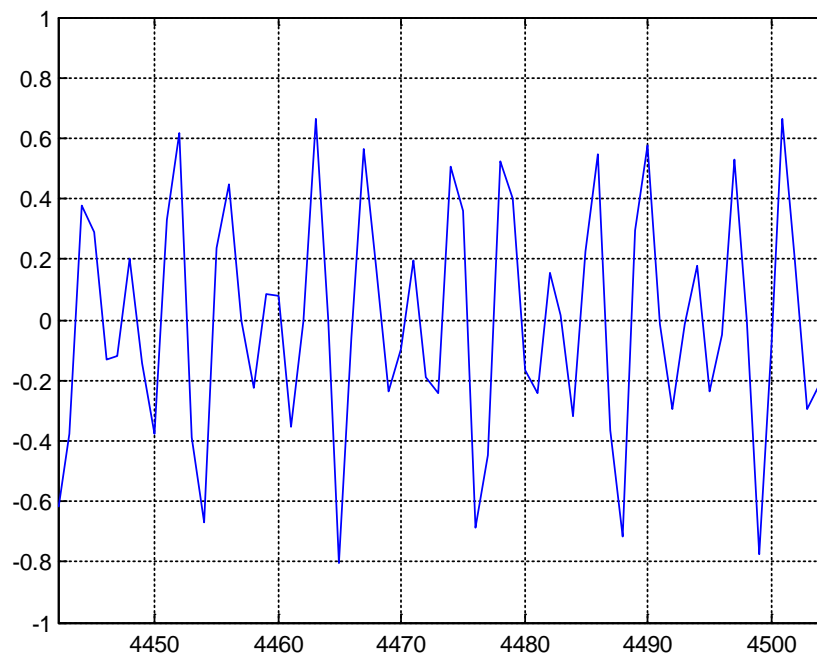


Рис. 41 Форма сигналу ноти Фа 3-ої октави

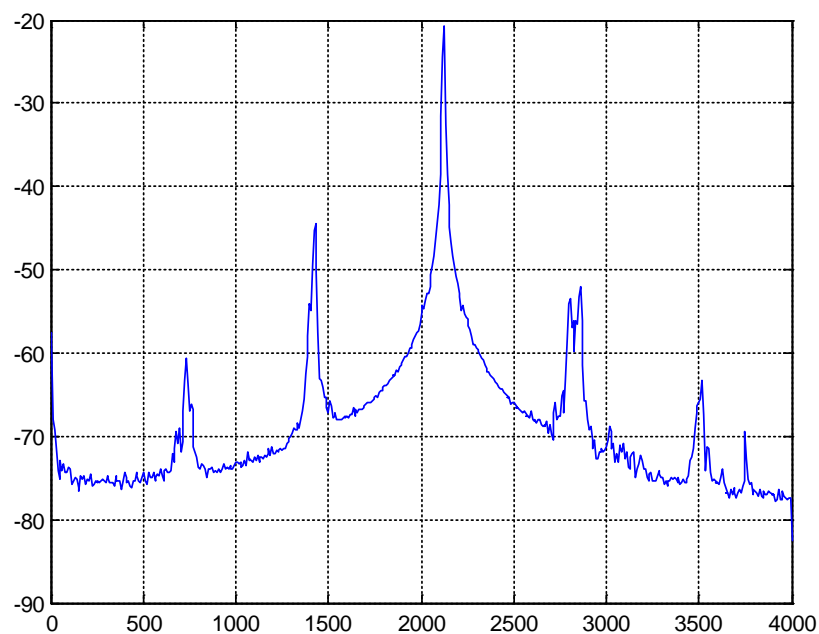


Рис. 42 Спектр сигналу ноти Фа 3-ої октави

Спостерігається аналогічна ситуація до графіку спектру ноти ля 2-ї октави поперечної флейти. Наявні не великі сплески між основними сплесками спектру. Та спостерігається явище резонансу, завдяки якому рівень третього спектрального піку (приблизно 2100 Гц) є значно вищим за рівень першого (на 40 дБ) та другого (на 25 дБ) основних піків (приблизно 500 Гц та 1450 Гц).

Запис ноти Соль 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

sol = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);
plot(sol);
grid on
audiowrite('sol.wav',sol,8000);
[x,Fs] = audioread('sol.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;
```

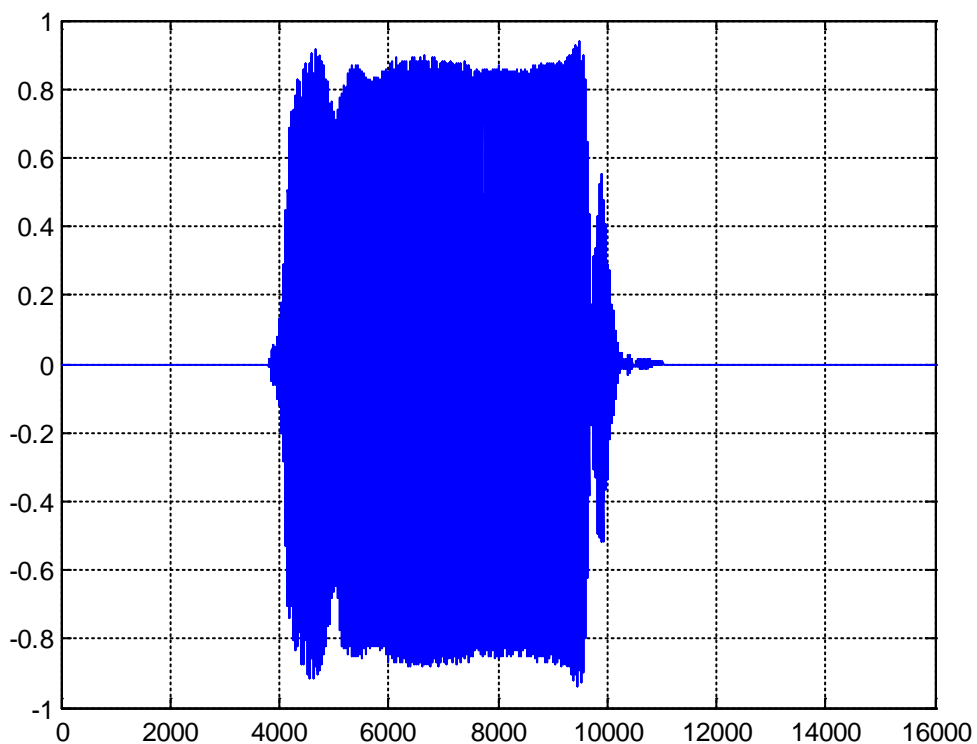


Рис. 43 Розгортка сигналу в часі ноти Соль 3-ої октави

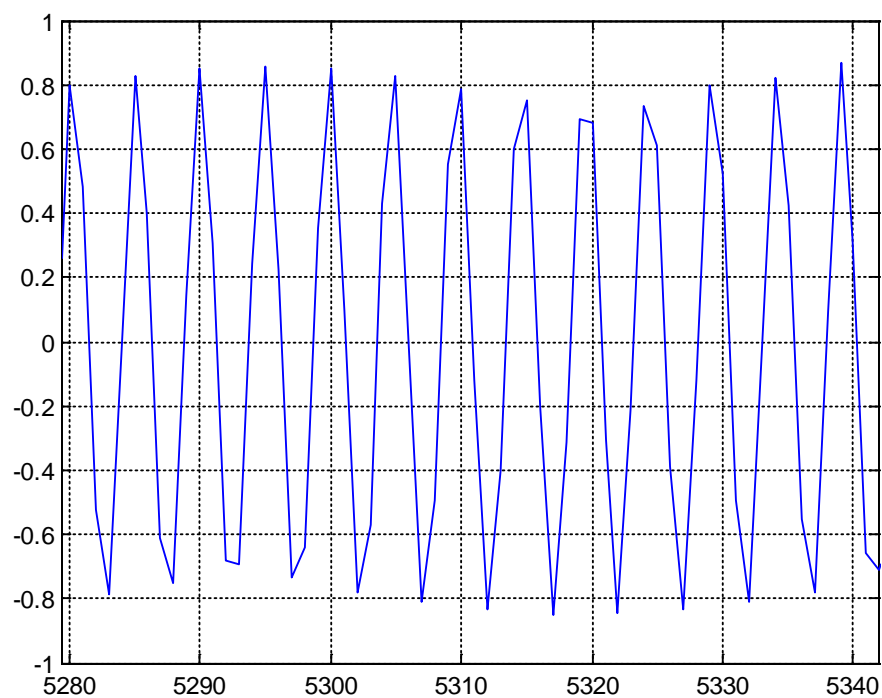


Рис. 44 Форма сигналу ноти Соль 3-ої октави

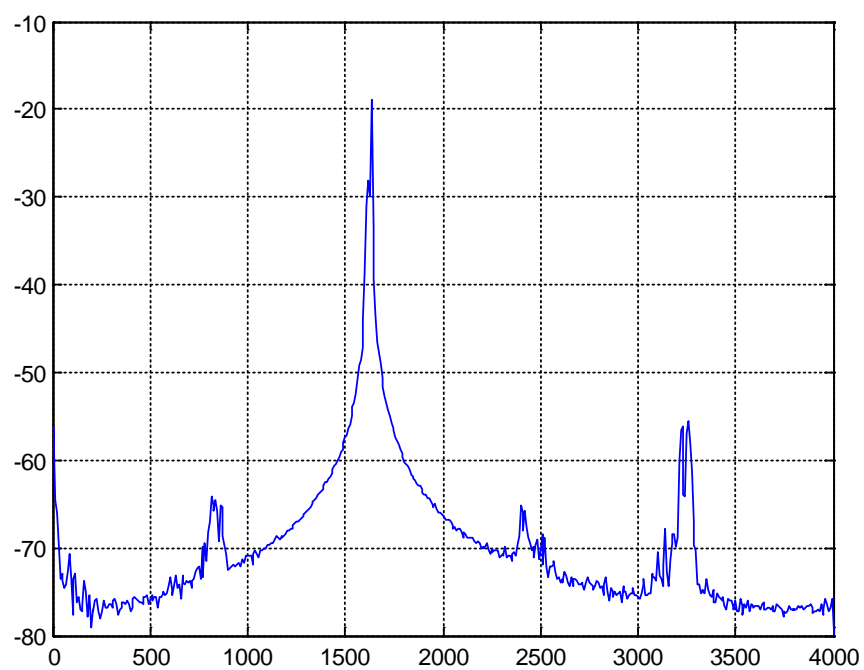


Рис. 45 Спектр сигналу ноти Соль 3-ої октави

Запис ноти Ля 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording. ');
la = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(la);
grid on
audiowrite('la.wav',la,8000);
[x,Fs] = audioread('la.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;
```

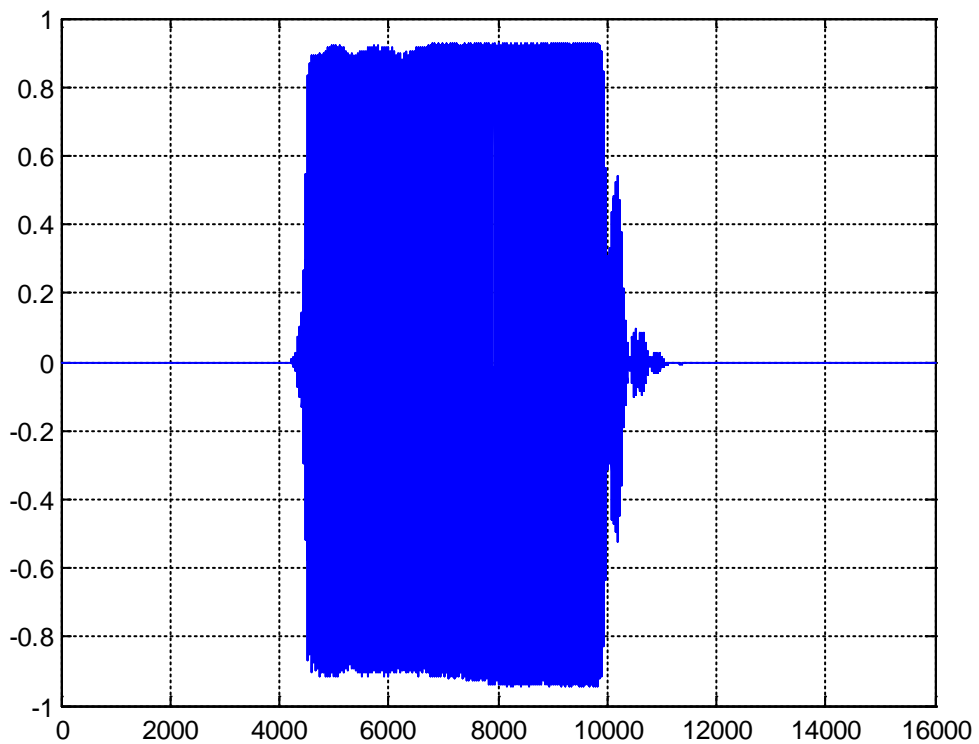


Рис. 46 Розгортка сигналу в часі ноти Ля 3-ої октави

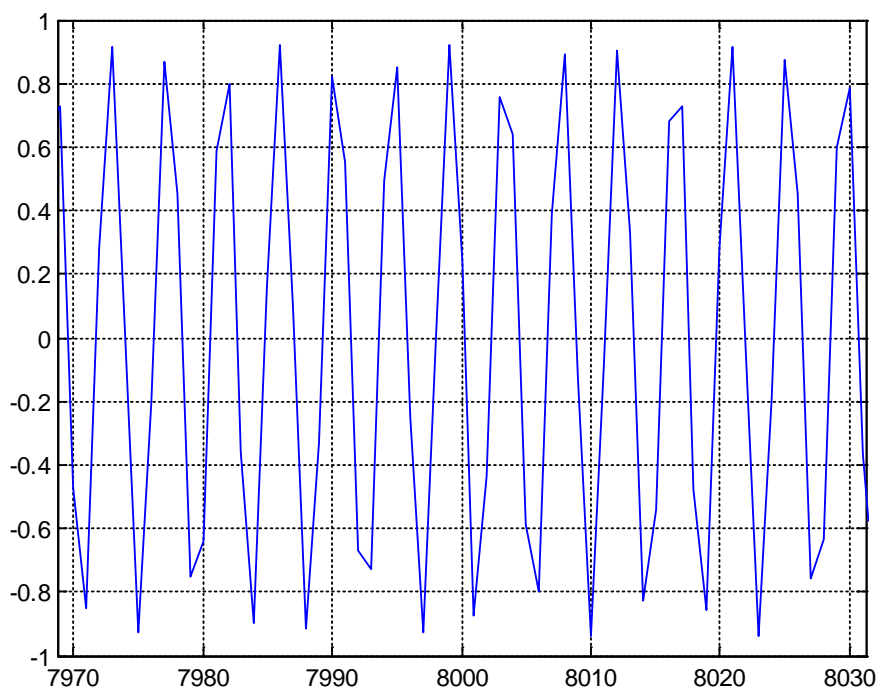


Рис. 47 Форма сигналу ноти Ля 3-ої октави

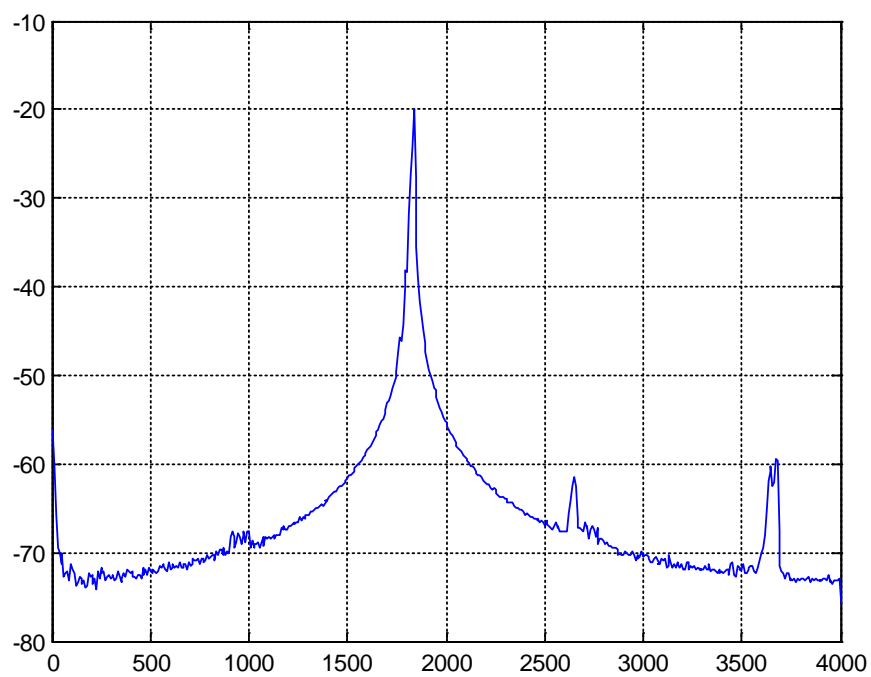


Рис. 48 Спектр сигналу ноти Ля 3-ої октави

Запис ноти Сі 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

si = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(si);
grid on
audiowrite('si.wav',si,8000);
[x,Fs] = audioread('si.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;

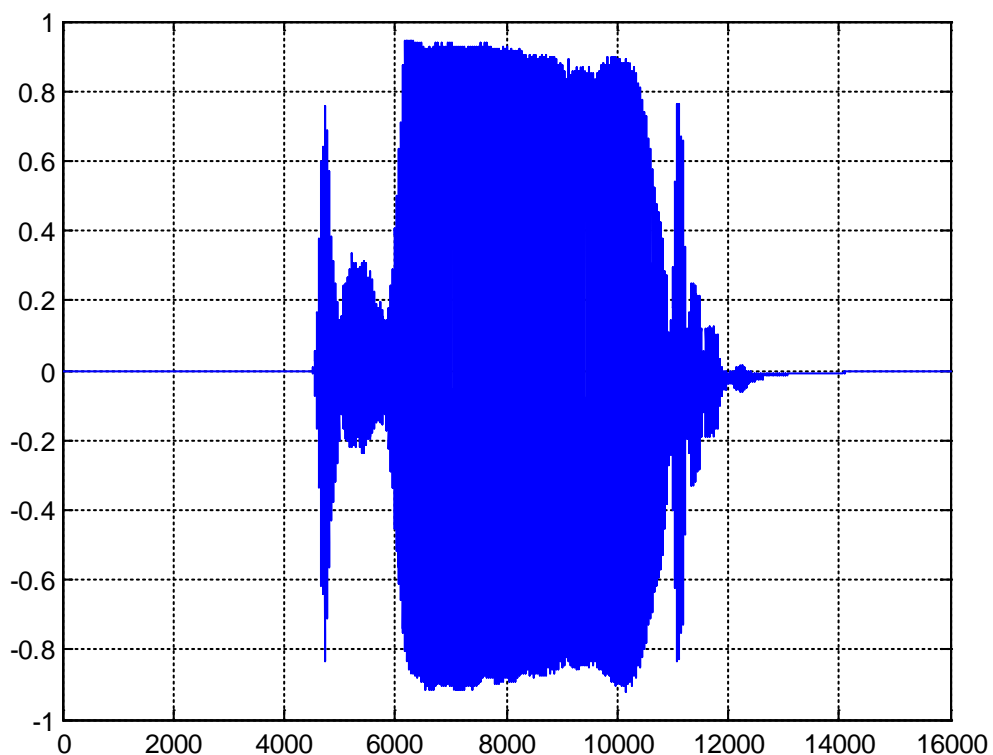


Рис. 49 Розгортка сигналу в часі ноти Сі 3-ої октави

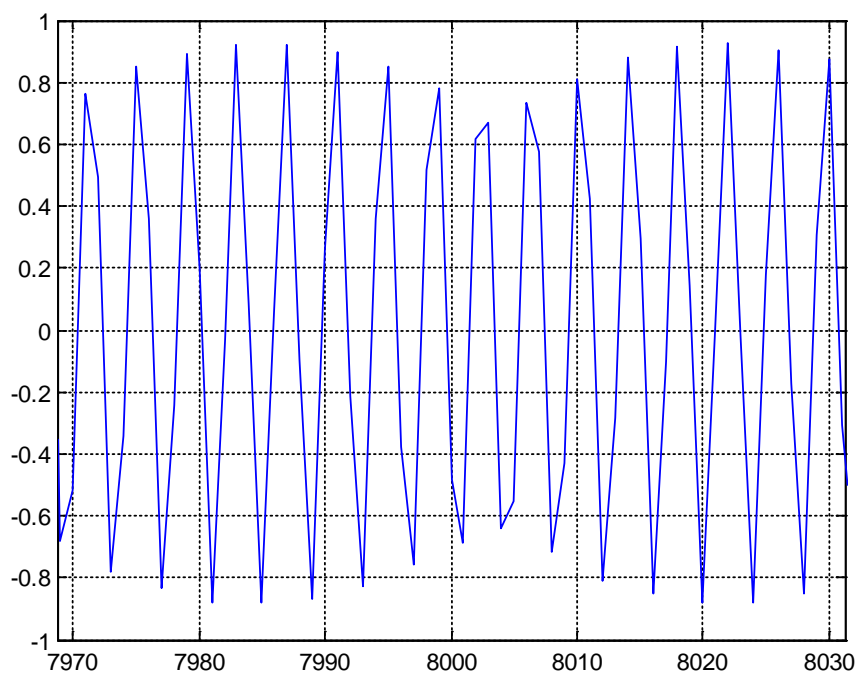


Рис. 50 Форма сигналу ноти Сі 3-ої октави

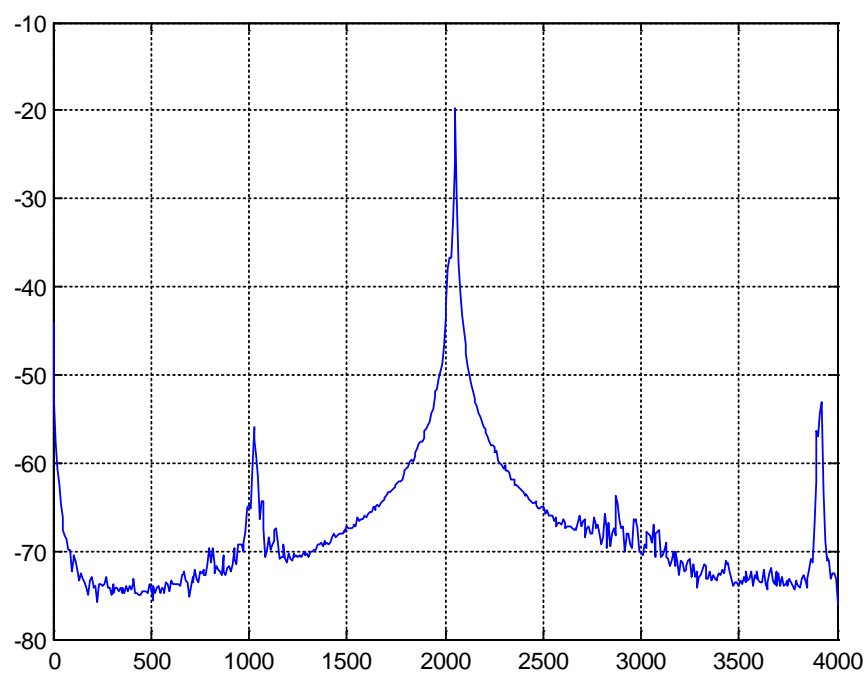


Рис. 51 Спектр сигналу ноти Сі 3-ої октави

Запис ноти До 4-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 2);
disp('End of Recording.');
```

do = getaudiodata(recObj);

```
play(recObj);
plot(do);
grid on
audiowrite('do_4.wav',do,8000);
[x,Fs] = audioread('do_4.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;
```

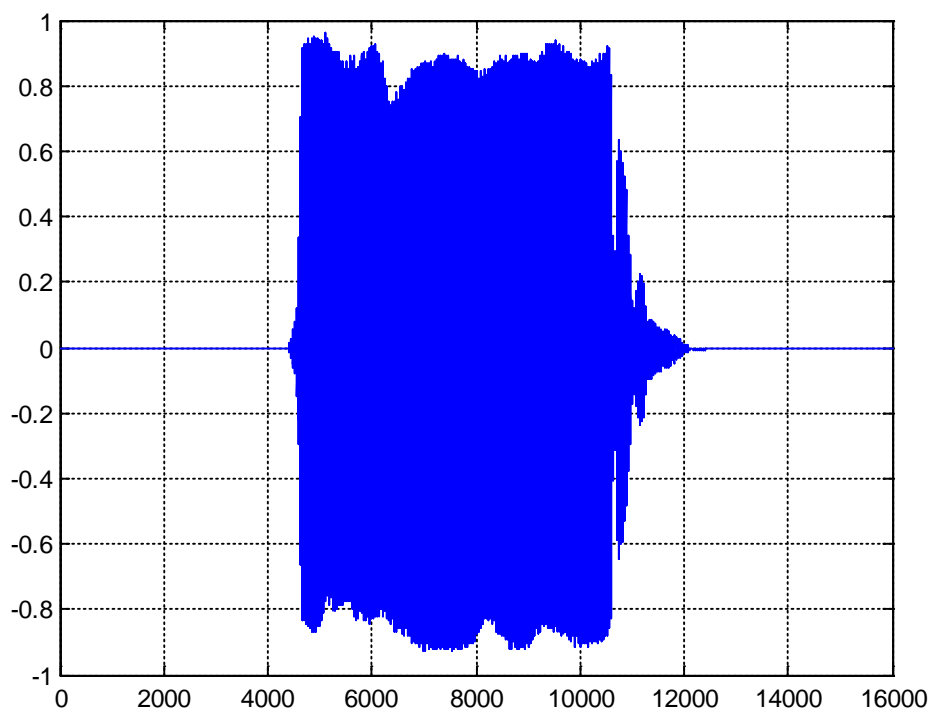


Рис. 52 Розгортка сигналу в часі ноти До 4-ої октави

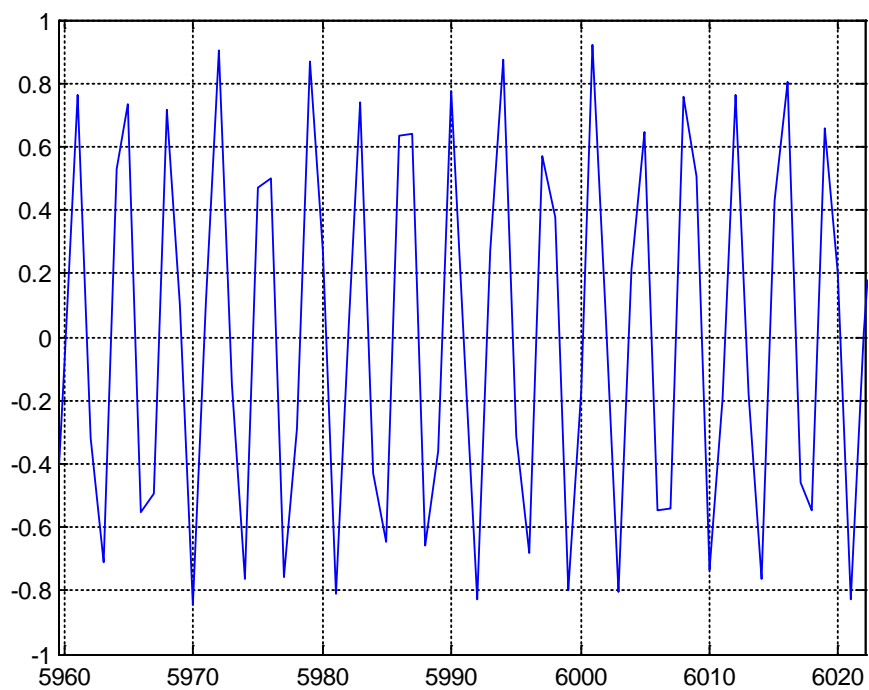


Рис. 53 Форма сигналу ноти До 4-ої октави

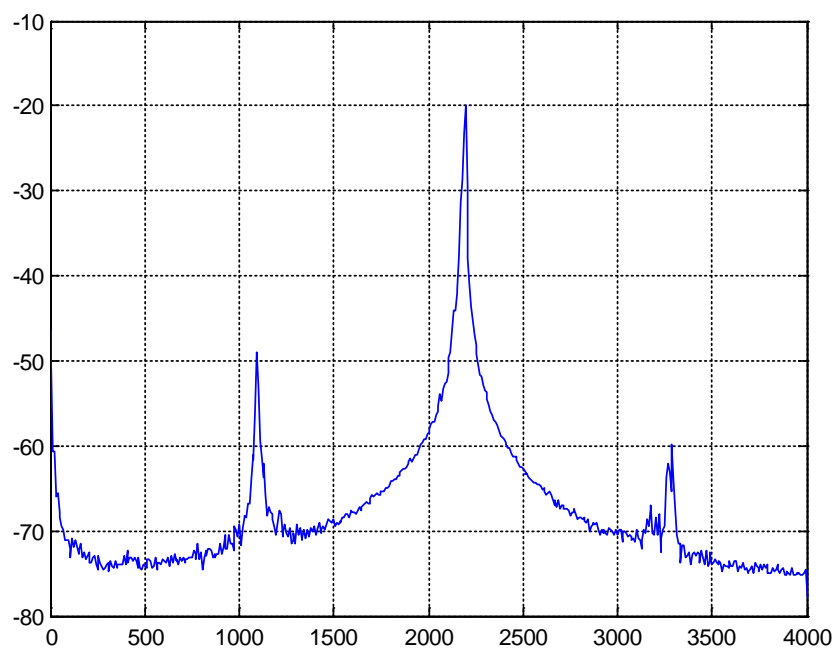


Рис. 54 Спектр сигналу ноти До 4-ої октави

Запис трелі на ноту Ля 3-ї октави та побудова спектру сигналу:

```
clc,clear
recObj = audiorecorder;
disp('Start speaking.')
recordblocking(recObj, 3);
disp('End of Recording.');
```

trel = getaudiodata(recObj);
play(recObj);
plot(trel);
grid on
audiowrite('trel.wav',trel,8000);
[x,Fs] = audioread('trel.wav');
[Pxx,f] = pwelch(x,rectwin(1024),512,1024,Fs);
figure; plot(f,10*log10(Pxx));
grid on;

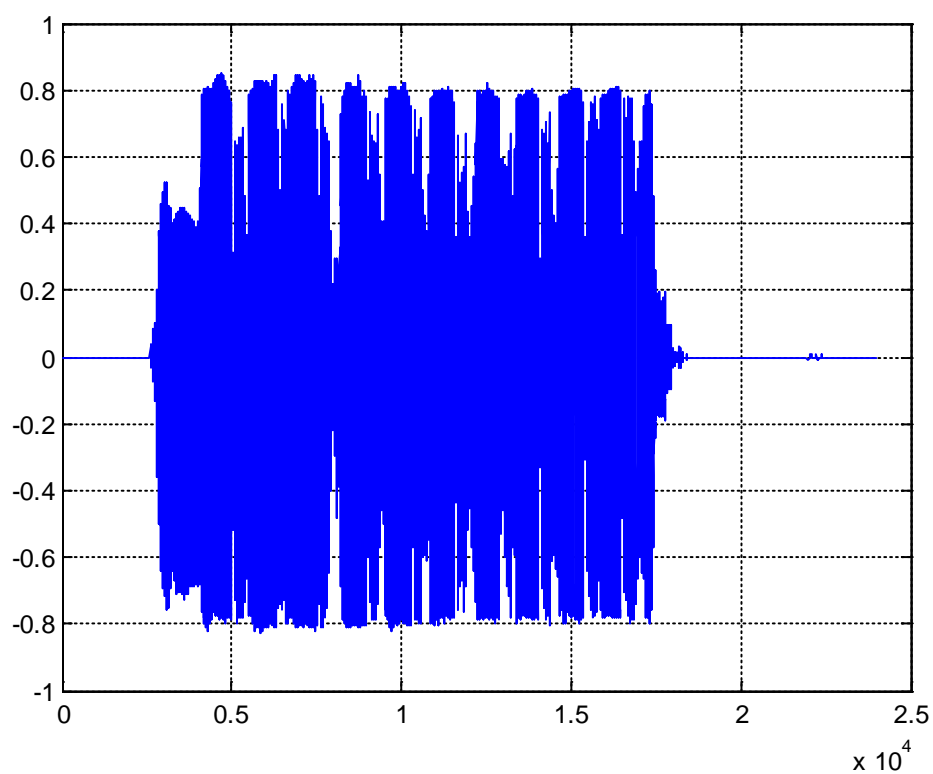


Рис. 55 Розгортка сигналу в часу трелі на ноту Ля 3-ої октави

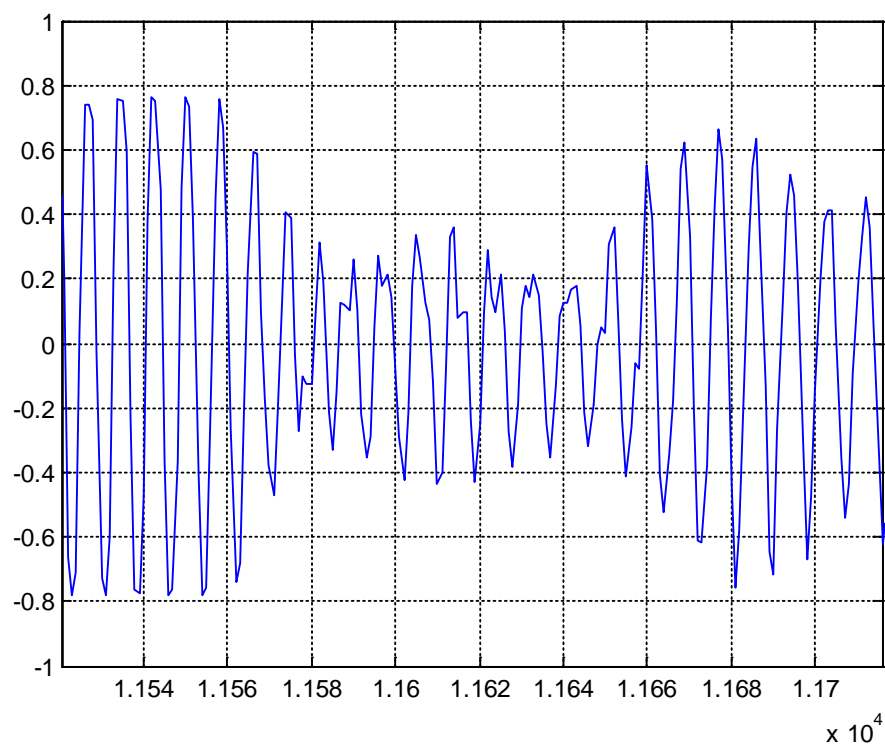


Рис. 56 Форма сигналу трелі на ноту Ля 3-ої октави

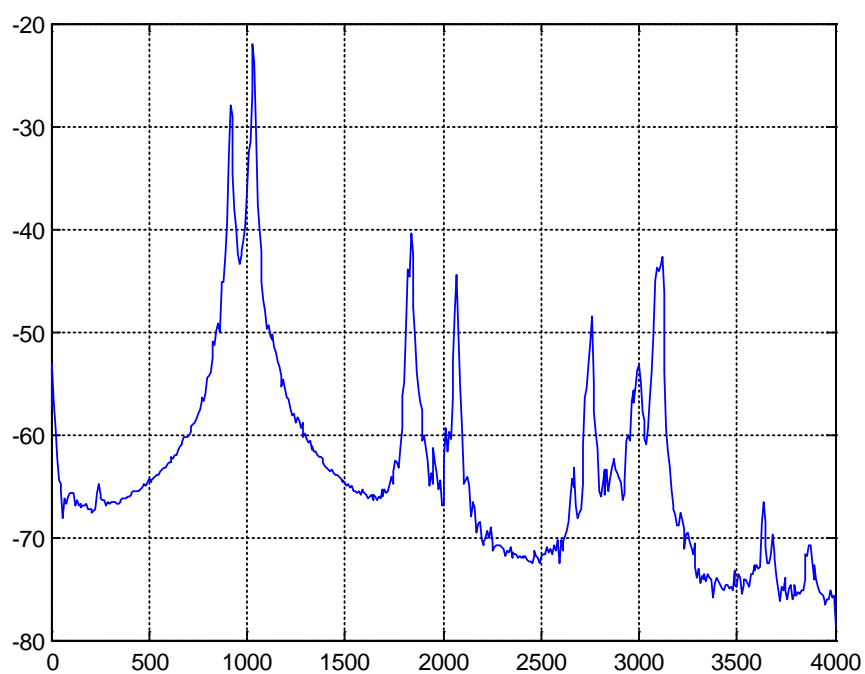


Рис. 57 Спектр сигналу трелі на ноту Ля 3-ої октави

ВИСНОВКИ

В даній роботі виконано аналіз акустичних характеристик двох флейт: поперечної флейти та флейти-піколо. Отримано форми сигналів та спектри сигналу кожної ноти, тому чітко спостерігаємо за графіками зміну спектру сигналів, відповідно і зміну тембру звуку флейти, що є характерною особливістю даного музичного інструменту.

У середньому регістрі флейта звучить м'яко, легко, плавно, яскраво і насичено. Ці характеристики часто використовуються для сольної роботи. У тихих проходах середній реєстр флейти звучить особливо витончено. У верхньому регістрі ноти мають значний «блиск» і можуть звучати проникливо і пронизливо. Вони ідеально підходять для відтворення мелодійних ліній разом із скрипками, і тому вони виконують це завдання практично в кожному оркестровому творі.

Цей детальний аналіз характеристик звуків флейти потрібен і для музиканта, і для фізика-акустика. Для композиторів це буде корисно при написанні творів, враховуючи характерні особливості флейти. Детальний об'єктивний (інструментальний) аналіз акустичних характеристик флейти дозволяє покращити роботу музикантів та композиторів, оскільки досьгодні такий аналіз виконувався переважно суб'єктивними методами слухового аналізу. Порівняння характеристик двох різних флейт показує, що дані інструменти мають свої тембральні особливості. Отримані результати також є корисними для фізиків-акустиків, наприклад, при синтезуванні звуку флейти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Алдошина И., Приттс Р. Музыкальная акустика. Учебник. – СПб.: Композитор. Санкт – Петербург, 2006. – 720 с., ил.
2. Ананьев А.Б. Альбом визуальных характеристик музыкальных звуков. К.: 2014. – 30 с.
3. Ананьев А.Б. Музыка и речи для звукорежиссера. Учебное пособие. К.: 2014. – 97 с.
4. Flute acoustics: an introduction to how a flute works [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/fluteacoustics.html>
5. Joun W. Coltman Effect of Material on Flute Tone Quality [Электронный ресурс], 520 – 523 с. – Режим доступа: <https://ccrma.stanford.edu/marl/Coltman/documents/Coltman-1.06.pdf>
6. North Carolina School of Science and Mathematics, Harmonics and Sound Quality [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://a1384-238214.cluster8.canvas-user-content.com/courses/1384~1159/files/1384~238214/course%20files/apb11o/1abs/L149/L149_sound_quality.htm
7. Стаття Automatic Assessment of Tone Quality in Violin Music Performance 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6427949/>
8. Nesterova O., Shapilov V., Bekenova A., Julmukhamedova A., Yermanov Z. Methods of playing wind instruments (using the flute as an example) The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication - TOJDAC ISSN: 2146-5193, September 2018 Special Edition, p.2379-2393
9. Ананьев А.Б. 111 ответов на вопросы звукорежиссеру. Учебное пособие. К.: 2014. – 30 с.
10. Ананьев А.Б. Математика для звукорежиссера. Выпуск 2. Учебное пособие. К.: 2014. – 23 с.